

Příprava a dmýchání horkého větru do vysoké pece

Preparation and Blowing of Hot Blast Air into a Blast Furnace

Jméno autora: Bc. Jan Majtán

Rok odevzdání: 2021

Abstrakt

Cílem diplomové práce Příprava a dmýchání horkého větru do vysoké pece je popsání současných nejnovějších trendů a metod v oblasti obohacení dmýchaného větru kyslíkem a vodíkem. To umožní navýšení spotřeby alternativních paliv, kterými je dosaženo výrazného snížení energetické a emisní náročnosti při výrobě surového železa ve vysoké peci.

Dílčím cílem experimentální části diplomové práce je rozpracování postupu pro stanovení ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy vysoké pece. A následné stanovení ztráty při dodatečné tepelné izolaci všech dmyšných elementů.

Klíčová slova: Dmyšný element, tepelná izolace, tepelné ztráta, horký dmýchaný vítr.

Abstract

The aim of the diploma thesis Preparation and Blowing of Hot Blast Air into a Blast Furnace is to describe the current latest trends and methods in the field of enrichment of blown hot blast air with oxygen and hydrogen. This will increase the consumption of alternative fuels, which achieve a significant reduction in energy and emission intensity in the production of pig iron in the blast furnace.

A partial goal of the experimental part of the diploma thesis is to develop a procedure for determining the loss of hot wind temperature by the blast elements of the blast furnace. And the subsequent determination of the loss during additional thermal insulation of all blowing elements.

Keywords: Tuyere stock, thermal insulation, heat loss, blown hot blast.

Diplomová práce vznikla za finanční podpory projektů „Studentské grantové soutěže“ čísel SP2021/39 a SP2021/41.

Seznam použitých veličin

r_2 - vnější poloměr elementu (mm)

t_{w2} - teplota pláště elementu ($^{\circ}\text{C}$)

t_a - teplota okolního vzduchu ($^{\circ}\text{C}$)

S - S_{pl} - obsah pláště elementu (m^2)

t_{st} - střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu) ($^{\circ}\text{C}$)

ν - kinematická viskozita ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

λ - součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

c_p - měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

ρ - hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Pr - Prandtlovo kritérium vztah (-)

Gr - Grashofovo kritérium (-)

g - tíhové zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

l - charakteristická rozměr (vnější průměr) (m)

β - součinitel tepelné roztažnosti, vztažen k t_{st} ($1\cdot\text{K}^{-1}$)

Nu - Nusseltovo kritérium (-)

α_k - součinitel přestupu tepla konvekcí ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

ε - poměrná pohltivost – emisivita (-)

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

Q_s - přestup tepla sáláním (W)

α_s - součinitel přestupu tepla sáláním ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

α_0 - celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

Q - celková tepelná ztráta (W), ($\text{GJ}\cdot\text{hod}^{-1}$), ($\text{kWh}\cdot\text{den}^{-1}$)

V_{HV} - množství horkého větru ($\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$)

T_{HV} - teplota horkého větru ($^{\circ}\text{C}$)

V_{O_2} - množství kyslíku v horkém větru ($\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$)

V_v - množství vzduchu v horkém větru ($\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$)

i_{O_2} - měrná entalpie kyslíku při zadané teplotě ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)

i_{vzduch} - měrná entalpie vzduchu při zadané teplotě ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)

i_{HV0} - měrná entalpie horkého větru při zadané teplotě ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)

$H_{(HV0)}$ - entalpie množství horkého větru přes 1.výfučnu za 1.hodinu při teplotě před dmyšnými elementy (GJ)

$H_{(HV1)}$ - entalpie množství horkého větru přes 1.výfučnu za 1.hodinu při teplotě za neizolovanými dmyšnými elementy (GJ)

$H_{(HV2)}$ – entalpie množství horkého větru přes 1.výfučnu za 1.hodinu při teplotě za izolovanými dmyšnými elementy (GJ)

$i_{(HV1)}$ - měrná entalpie horkého větru za neizolovanými dmyšnými elementy ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)

$i_{(HV2)}$ - měrná entalpie horkého větru za izolovanými dmyšnými elementy ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)

Δt_1 – pokles teploty horkého větru za neizolovanými dmyšnými elementy ($^{\circ}\text{C}$)

Δt_2 – pokles teploty horkého větru za izolovanými dmyšnými elementy ($^{\circ}\text{C}$)

OBSAH

ÚVOD.....	2
1 ANALÝZA A TEORETICKÝ ROZBOR LITERÁRNÍCH POZNATKŮ Z OBLASTI DMÝCHÁNÍ VYSOKOPECNÍHO VĚTRU DO VYSOKÝCH PECÍ	3
1.1 Energetická náročnost a produktivita vysoké pece	6
1.2 Systém ohřívачů větru	10
2 VÝPOČET ZTRÁTY TEPLoty HORKÉHO VĚTRU DMYŠNÝMI ELEMENTY VYSOKÉ PECE	13
2.1 Popis dmyšných elementů	13
2.2 Teoretické základy přestupu tepla	17
2.2.1 Přestup tepla prouděním (konvekcí)	18
2.2.2 Přestup tepla vedením (kondukcí)	18
2.2.3 Přestup tepla sáláním (radiací)	19
2.2.4 Bezrozměrná kritéria	19
2.3 Postup výpočtu ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy.....	20
2.3.1 Výpočet povrchů jednotlivých dmyšných elementů	23
2.3.2 Výpočet tepelných ztrát na pískále	25
2.3.3 Výpočet tepelných ztrát na koleně.....	29
2.3.4 Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru	32
2.3.5 Výpočet poklesu teploty horkého větru za dmyšnými elementy.....	36
3 VYHODNOCENÍ A PŘÍNOS V PRAXI.....	40
4 ZÁVĚR.....	42
SEZNAM LITERATURY	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM TABULEK	47
PŘÍLOHY	48
Příloha č. 1: Výpočet tepelných ztrát na pískále	
Příloha č. 2: Výpočet tepelných ztrát na kolenu	
Příloha č. 3: Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru	
Příloha č. 4: Výpočet poklesu teploty větru	
Příloha č. 5: Výsledky měření č.1–12 celkově	

ÚVOD

Současná technologie výroby surového železa se především zaměřuje na snížení emisí CO_2 , na snížení nákladů na výrobu jedné tuny surového železa a co možná nejlepší využití koksu a náhradních paliv. Díky rozvoji technologií a nových vědeckých poznatků je i nadále prostor pro zlepšování těchto nových technologií a postupné zavádění nových poznatků do praxe.

Pro zvýšení produktivity a úsporu paliva je potřeba optimálních podmínek ve vysoké peci. Z tohoto pohledu je důležité správné řízení procesu ohřívачů větru, jeho příprava a dmýchání.

Při stabilní jakosti a zrnitosti koksu záleží délka oxidačních prostorů především na skutečné rychlosti větru ve výfučně. Dosažení stálé rychlosti větru ve výfučnách je jednou z hlavních zásad řízení práce vysoké pece. O optimální rychlosti větru rozhoduje celá řada místních podmínek práce pece.

Příprava a dmýchání horkého větru do vysoké pece je komplikovaný proces, při kterém dochází ke ztrátám tepla a teploty při průchodu horkého větru dmyšnými elementy do vysoké pece. Tyto ztráty tepla ve svém důsledku znamenají i ztráty ekonomické, neboť potřebné „nevyužité“ teplo je v rámci vysokopecního procesu pokryto spotřebou koksu, který tvoří podstatnou položku nákladů. Pro efektivní průběh procesu je proto potřeba zamezit ztrátám tepla.

Za tímto účelem bylo provedeno zaizolování dmyšných elementů. Následně pak bylo potřeba určit, zda při zaizolování dmyšných elementů dochází k požadované úspoře energie a to si za svůj cíl klade tato diplomová práce.

V rámci řešení tohoto úkolu bylo nejprve provedeno měření povrchové teploty u jednotlivých dmyšných elementů infrateploměrem. Byla tak získána data pro následně provedené výpočty tepelných ztrát horkého větru dmyšnými elementy vysoké pece. Následně byla získaná data vyhodnocena a vyčísleny úspory energie.

1 ANALÝZA A TEORETICKÝ ROZBOR LITERÁRNÍCH POZNATKŮ Z OBLASTI DMÝCHÁNÍ VYSOKOPECNÍHO VĚTRU DO VYSOKÝCH PECÍ

V současnosti je budoucnost výroby surového železa ve vysokých pecích podmíněna jak dalším zvyšováním vysokopecní produktivity, snižováním měrné spotřeby koksu a paliv, zvyšováním kvality produkce, tak také minimalizací ekologických dopadů na životní prostředí.

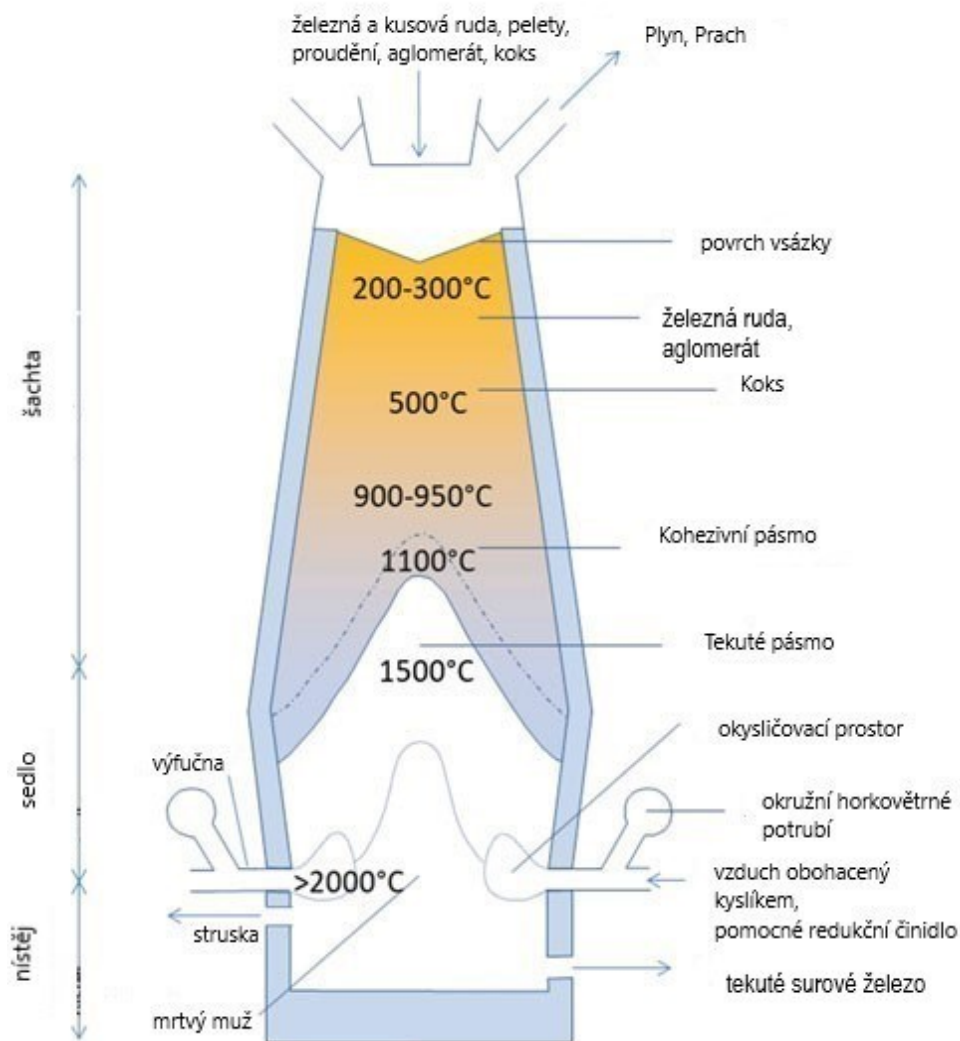
Základem pro studium vysokopecních a jiných redukčních pochodů je jejich teorie. Chemická reakce obecně probíhá jen mezi menším počtem přesně definovatelných látek při známých vnějších podmínkách. Ve vysoké peci jde o neporovnatelně složitější děje, kdy reakce, které zde probíhají jsou často souběžné při stále se měnících vnějších podmínkách a navzájem se ovlivňují. Ve velkém množství navzájem mezi sebou na sebe působí pevné látky, plyny kondenzované fáze a kapaliny. V tomto případě je studium těchto dějů je velmi obtížné. K tomu přistupuje vliv extrémně vysokých teplot a nebezpečí plynoucích z toxicity a výbušnosti plynu, takže vlastní reakční prostor není přístupný přímo.

V rámci vysokopecního procesu jsou oxidy železa ve vysoké peci redukovány a produktem je tekuté surové železo a struska. Užité množství současných vysokých pecí je 100–5 000 m³, což vzhledem k produkci představuje 70% celosvětové výroby oceli vyprodukované ve vysokých pecích [1].

Základní přednosti vysoké pece:

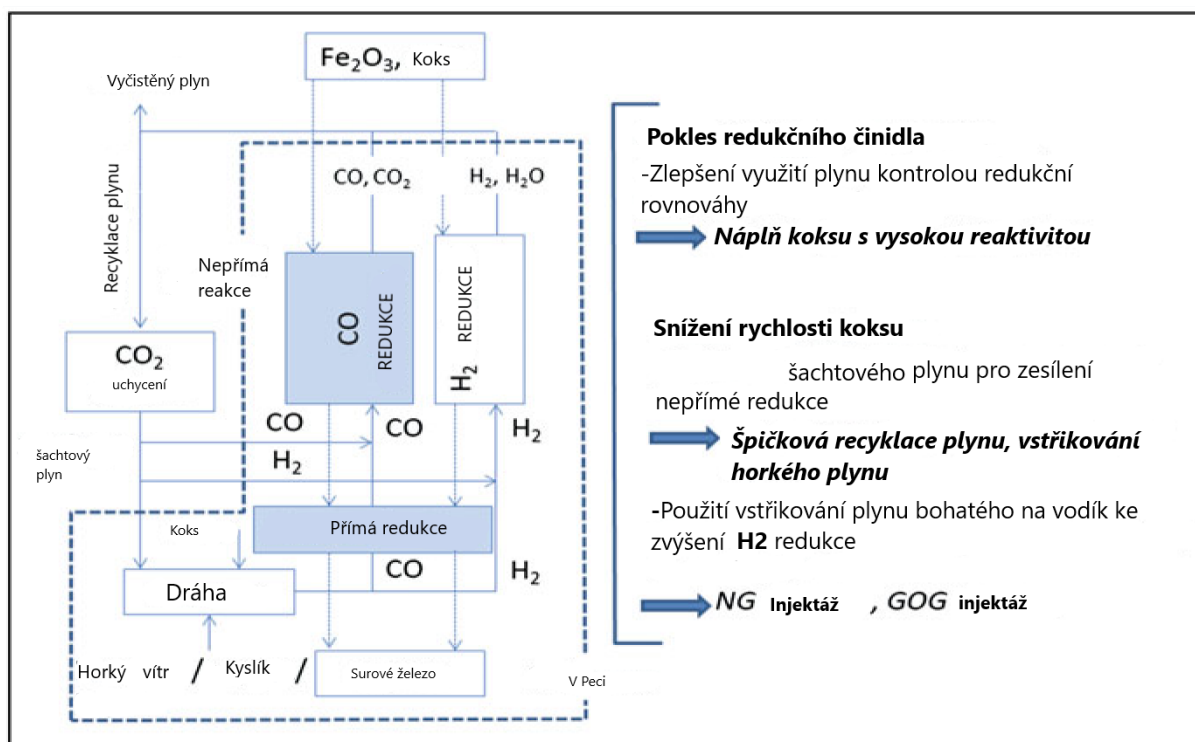
- vysoká pec patří mezi typická velkovýrobní zařízení,
- plynulé jsou jak plnění vysoké pece, přívod dmýchaného větru a odvod plynu,
- vysoký stupeň přestupu tepla a vysoký stupeň jeho využití je umožněn protiproudým systémem výměny hmoty a tepla,
- ztráty železa ve strusce a jiné nevratné ztráty jsou velmi malé, naopak výtěžnost železa ze vsázky převyšuje 98 %.
- Vysoká pec má vysoký stupeň odstranění síry přinesené vsázkou.

Vysokou pec je možné považovat za protiproudý výměník tepla a látek, neboť teplo se přenáší z plynu na vsázku a kyslík přechází ze vsázky do plynu. Plyn ve vysoké peci stoupá nahoru a vsázka a koks klesá dolů. Právě tento protisměrný charakter reakcí zaručuje vysokou efektivitu tohoto procesu. Schéma vysoké pece s vyznačením teplotních zón přináší obr. 1.



Obr. 1 Vysoká pec [1]

Do vysoké pece se zavázejí železné rudy, aglomerát nebo pelety, koks a vápno shora; horký stlačený vzduch proudí z dmyšen ve spodní části pece. Horký dmýchaný vítr (obvykle obohacený kyslíkem) a náhradní paliva (jako např. prachové uhlí) jsou injektována přes dmyšné armatury poblíž dna pece [2]. Tento dmýchaný vítr reaguje s koksem ve vsázce za vzniku redukčních plynů (oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodík), které tvoří protiproud k sestupující vsázce (obr.2).



Obr. 2 Využití uhlíku pomocí redukčních mechanismů [1]

Vysokopecní vsázce trvá 6-8 hodin, než sestoupí na dno pece a vzniknou tekuté produkty-struska a tekuté surové železo [3]. Dmychadla poskytují tlak pro injektáž větru, zatímco ohřívače větru zajišťují předehřátí vzduchu až na 1350 °C [4].

Intenzifikace výrobního pochodu ve vysokých pecích je v současné době ovlivňována prudkým nárůstem cen energií a narůstajícím nedostatkem koksu. Parametry výrobního procesu jsou dle využití různých náhradních paliv rozdílné především v přepočtu na úsporu metalurgického koksu, které je dále závislé na množství přidávaného kyslíku pro obohacení větru a dosažení optimální teploty nístějového plynu.

Přidávání náhradních paliv do vysoké pece ovlivňuje metalurgické pochody ve vysoké peci, celkovou materiálovou a tepelnou bilanci. Významný dopad při využití náhradních paliv je na spotřebu energií s cílem snižování výrobních nákladů na tunu surového železa. Dále pak využívání náhradních paliv významně snižuje zátěž na životní prostředí. [5]

Dmýchání horkých redukčních plynů do výfucen vysoké pece množství koksu snižuje, neboť při tomto pochodu klesá teplota plamene jen málo a ovlivnění proudění plynů nespálenými částicemi uhlíku lze zanedbat, aby se dosáhlo tohoto pozitivního efektu, musí horký redukční plyn obsahovat více než 95% CO a H₂ a mít teplotu minimálně 1000°C.

V minulých letech byla spotřeba koksu snížena prostřednictvím technologických opatření jako je zvýšení teploty větru, zvýšení tlaku na sazebně a obzvláště injektování náhradních redukovadel a paliv.

V současné době je kladen velký nárok na optimalizaci vsázky pro výrobu surového železa, a to především z hlediska dosažení minimální spotřeby koksu. Minimální spotřebu koksu lze dosáhnout při optimálním poměru přímé a nepřímé redukce. [5]

Lze injektovat i další paliva, jako je ropa, zemní plyn, prachové uhlí nebo plastový odpad jako náhradu koksu [5]. Ve spodní části pece je koks zplyňován a vzniká CO, které je redukčním činidlem redukčního plynu proudícího směrem k horní části pece [6]. Roztavené tekuté surové železo je shromážděno u dna pece, zatímco struska plave na roztaveném železe. Vysokopecní plyn je z pece odváděn shora, následně je vyčištěn, ochlazen a běžně spalován jako palivo v ohřívacích větru, kde se předehřívá vzduch vstupující do vysoké pece [1]. Přebytný plyn se využívá k vyrábění páry, elektřiny nebo se využívá na ohřev jiných hutních agregátů v podniku.

1.1 Energetická náročnost a produktivita vysoké pece

Energetická náročnost provozu vysoké pece je řádově $11,6 \text{ GJ.t}^{-1}$ tekutého surového železa. Je to nejvyšší spotřeba energie mezi všemi fázemi integrované výroby oceli z důvodu vysokého množství redukčních látek [1]. Přestože je vysoká pec energeticky efektivní proces, stále spotřebovává o 25–30% více energie než je absolutní teoretické minimum, které představuje hodnotu $9,8 \text{ GJ.t}^{-1}$ tekutého surového železa. Potenciální úspora energie v jednotlivých závodech závisí na technologiích, které se již používají a na těch které lze využít [7]. Nejmodernější vysoké pece již fungují blízko ideálních procesních podmínek, a proto existuje relativně malý prostor pro další snížení spotřeby energie v těchto zařízeních. Hlavní problémy životního prostředí souvisejí zejména s produkcí CO_2 , prachu, odpadních vod z čištění plynu, produktů na úpravu strusky, např. SO_2 a H_2S a kalů. Vysokopecní plyn má velmi nízkou výhřevnost, takže se používá hlavně pro samotnou vysokou pec, nebo ve směsi s koksárenským plynem. V USA byly v rámci studie provedené C. Penem [8] definovány energeticky účinné technologie použité pro snižování emisí ve vysokých pecích.

Velikost vysoké pece ovlivňuje její účinnost, přičemž menší pece v Číně emitují až o 25% emisí více CO_2 než velké. Produkce CO_2 pro čínské vysoké pece s kapacitou $> 3000 \text{ m}^3$ je $1,09 \text{ t CO}_2.\text{t}^{-1}$ surového železa ve srovnání s $1,31 \text{ t CO}_2.\text{t}^{-1}$ surového železa pro ty s kapacitou $300\text{--}999 \text{ m}^3$. Větší vysoké pece jsou obvykle účinnější, protože tepelné ztráty jsou nižší a je obvykle

ekonomičtější instalovat energeticky efektivní zařízení [9]. U vysokých pecí od určité velikosti energetická účinnost nezávisí na výrobní kapacitě. Existuje mnoho energeticky účinných středně velkých vysokých pecí produkujících 3 500–6500 tun surového železa za den. V Číně a Indii existuje trend využívat mini-vysoké pece. To umožňuje malou výrobu oceli, která je lépe přizpůsobená okolním podmínkám na trhu. [1] To však má za následek nižší energetickou účinnost. Dle odhadů IEA [1,10] lze emise CO_2 v Číně snížit o 37 Mt za rok, pokud by všechny pece byly stejné efektivní jako největší vysoké pece, které jsou v současné době v provozu.

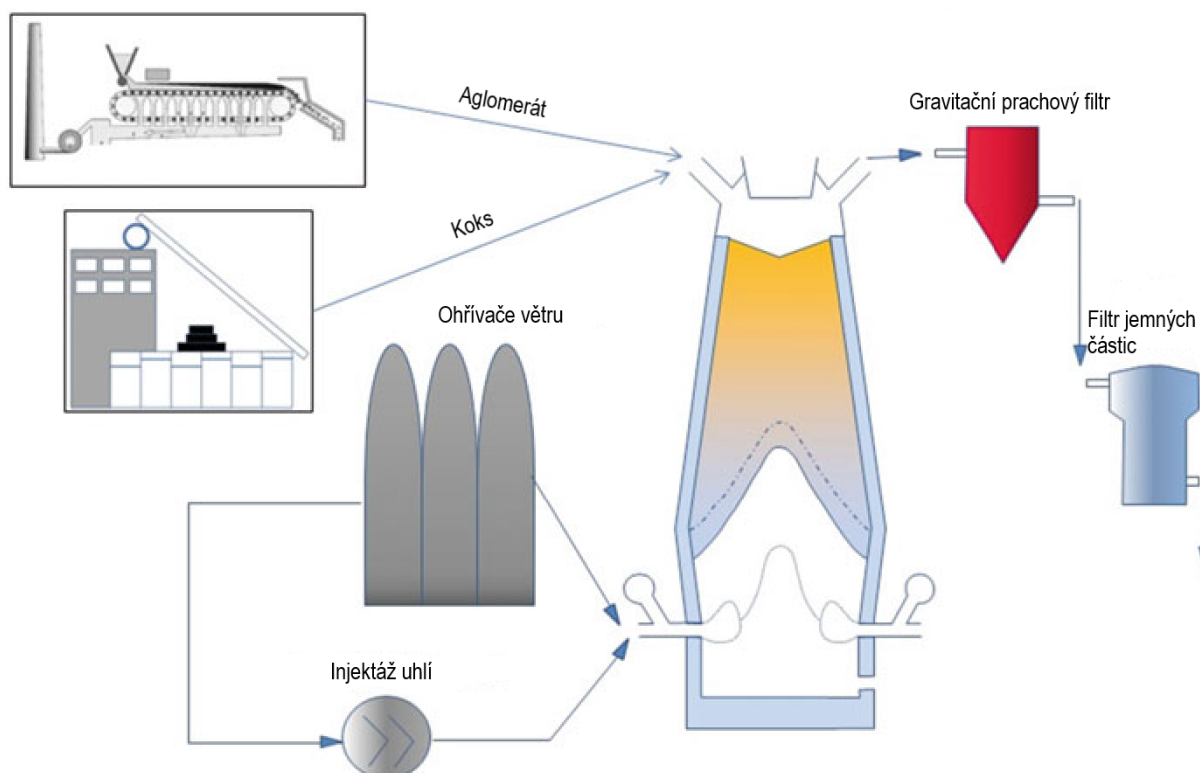
Ačkoli se nyní jako náhradní palivo běžně používá prachové uhlí, provozuschopnost pro dosažení nižší spotřeby koksu je injektáží prachového uhlí omezena [10]. U některých vysokých pecí (tzv. nízkoteplotní vysoké pece) je chod založen na vsázce koksu s vysokou reaktivitou, což se jeví jako reálná cesta k nízkouhlíkovému hospodářství. Perspektivní se jeví také kombinace kyslíkové vysoké pece s recyklací vysokopecního plynu. Výsledky studie hmotnostní a tepelné bilance kyslíkové vysoké pece s recyklací vysokopecního plynu ukázaly výhodu tohoto procesu při snižování CO_2 [1].

Ačkoli je proces recyklace vysokopecního plynu založený na kyslíkové vysoké peci velmi účinný, pro snižování emisí CO_2 , je nezbytné celkové vyhodnocení integrovaných oceláren z hlediska energetické soběstačnosti. Kyslíková vysoká pec umožňuje injektáž velkého množství zemního plynu kromě prachového uhlí. Optimalizovaná injektáž zemního plynu a prachového uhlí umožňuje snížit emise CO_2 při zachování potřebného dodávání energie do navazujících procesů a tím je docílena energetická konzistence v integrovaných ocelárnách [1]. Navíc díky vysoké produktivitě kyslíkové vysoké pece může být vnitřní objem pece zmenšen, což umožňuje použití méně kvalitních vsázkových materiálů s doprovodnými energetickými úsporami v aglomeračním procesu a při výrobě koksu. Tyto výhody byly shrnuty pod pojem moderní kyslíková vysoká pec, která směřuje k procesu výroby železa nové generace.

V procesech s využitím technologie injektáže prachového uhlí může být spotřeba koksu snížena na cca přibližně 300 kg.t^{-1} surového železa. Dolní hranice je určena hořlavostí prachového uhlí, která se vztahuje k poměru náhrady tohoto prachového uhlí za koks a propustností ve vysoké peci. Dále jsou tyto podmínky ovlivněny typem uhlí používaného k injektování a kvalitou vsázky. Přímé snížení metalurgického koksu ve vysoké peci, které souvisí s reaktivitou koksu, může být nahrazeno nepřímým snížením ve formě injektáže redukčního plynu do spodní části šachty. Podle teoretické analýzy hmotnostní a tepelné bilance vysoké pece se spodní hranice reaktivity koksu odhaduje na cca 220 kg.t^{-1} [1].

Odhaduje se, že moderní kyslíkové vysoké pece s optimalizovanou vodíkovou injektáží budou mít spotřebu koksu kolem 200 kg.t^{-1} surového železa. Pro snížení emisí CO_2 by měl být kladen zvláštní důraz na výběr injektážních látek vhodných pro dosažení snížení uhlíku [1].

Proces vylepšeného řízení ohřivačů větru a jejich automatizace vede k optimálním podmínkám ve vysoké peci s následnou úsporou paliva a zvýšenou produktivitou, jak ukazuje obr. 3 [11].

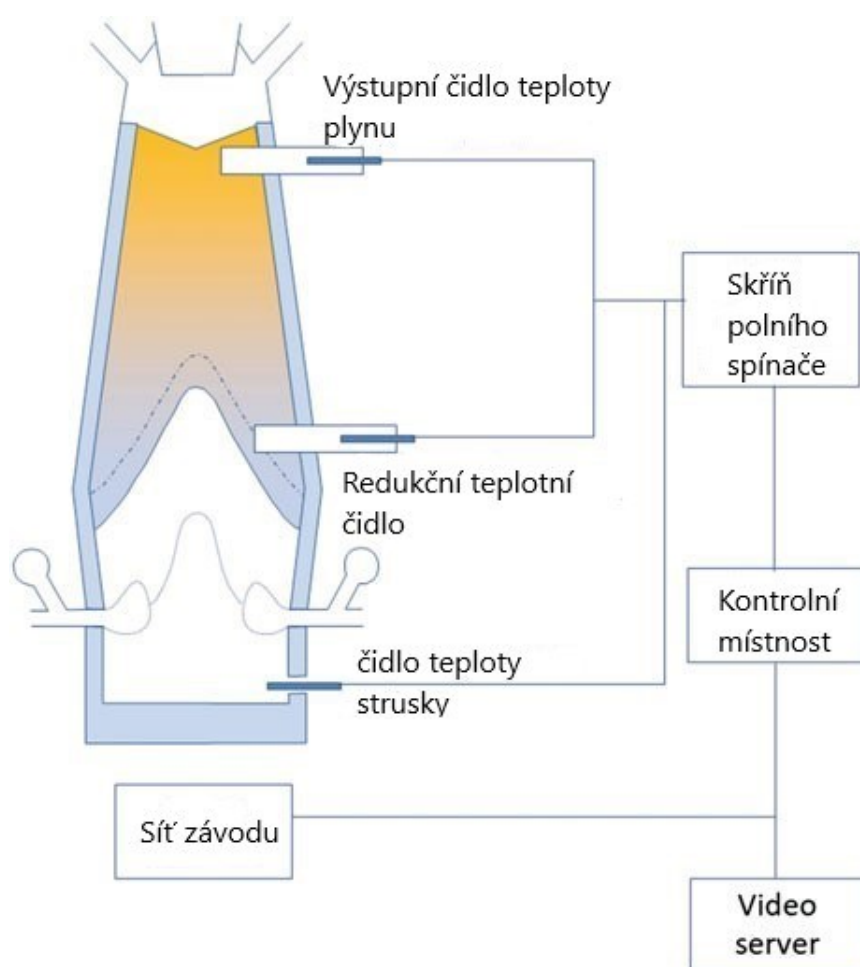


Obr.3 Proces vylepšeného řízení ohřivačů větru pro vysokou pec [11]

Úspora energie může být kolem 17 % se snížením emisí CO_2 o $22,6 \text{ kg CO}_2. \text{ t}^{-1}$ surového železa. Náklady se pohybují kolem $0,47 \text{ USD.t}^{-1}$ surového železa s velmi krátkou návratností. Ohřivače větru ohřívají směsný plyn se vzduchem, kyslíkem, párou a recyklovaným plynem z vysoké pece a dodávají tento směsný plyn do vysoké pece. V souvislosti se skutečnými podmínkami v ohřivačích větrů bylo použito pokročilé řídicí technologie pro optimalizaci procesu; dynamického optimalizačního algoritmu pro nalezení optimálního poměru vzduchu a paliva v ohřivačích větru, který optimalizuje řízení spalovacího procesu [12]. Provozní výsledky ukázaly zlepšenou přesnost ovládání kopule a teploty horkého

větru a také sníženou spotřebu plynu [13]. Pokročilý řídicí systém teploty kopule zahrnuje velmi mnoho faktorů, například měnící se tlak v potrubí a plynu.

Automatické řídicí smyčky slouží k dosažení automatické optimalizace chodu. Řídicí systém spalování využívá pokročilou technologii, která je výhodná z hlediska úspory energie a spotřeby plynu, v průměru nižší než původní kontrolní systém o 5,36 %. Regulace teploty přívodu vzduchu je stabilnější, takže stabilní provozní podmínky celkově zlepšují kvalitu a výkon. Řízení je vyvíjeno nepřetržitým sledováním klíčových parametrů, které lze vyladit tak, aby fungovaly vždy za optimálních podmínek (viz. obr. 4). Tímto způsobem je možné plynule měnit množství paliva nebo redukčních činidel [1].

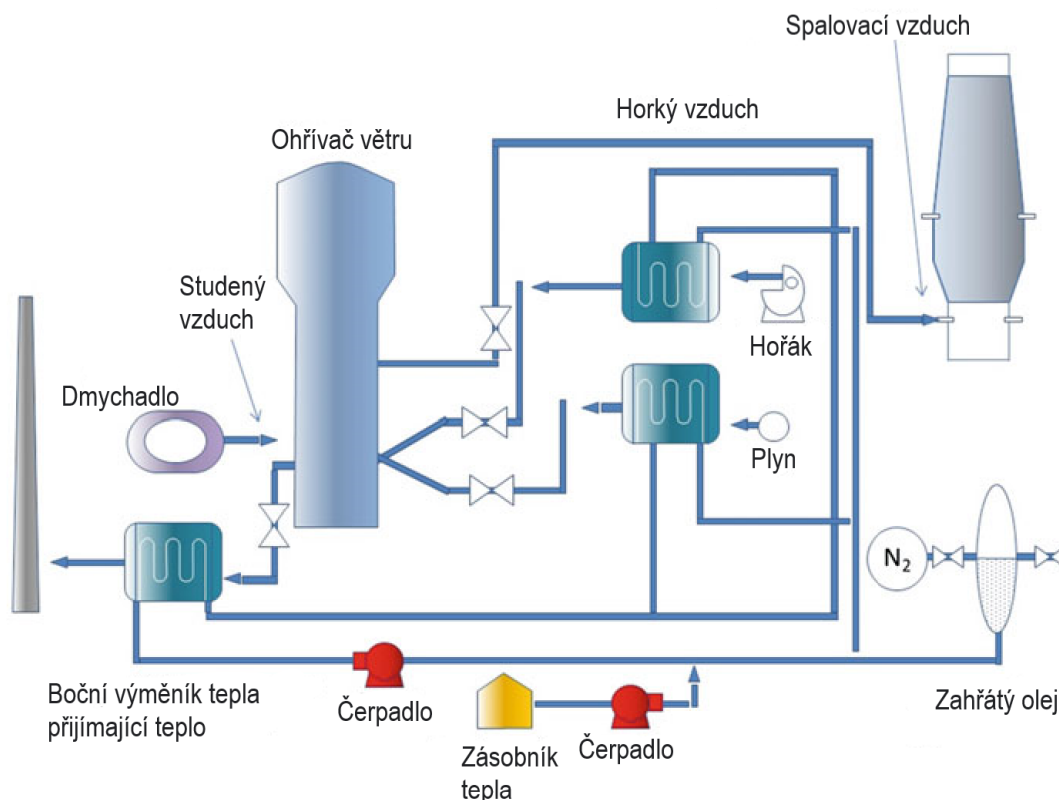


Obr. 4 Řídicí systém VP [1]

Přesnou kontrolou podmínek zpracování je možné optimalizovat kvalitu horkého větru v peci a spotřebu energie a následně snížit náklady.

1.2 Systém ohřivačů větru

Ohřivače větru vyžadují vysokou spotřebu energie (3 GJ.t^{-1} tekutého surového železa), která je vyšší než 30% energie spotřebované při vysokopecních operacích a přibližně 20% z celkové spotřeby energie integrované ocelárny. Schéma systému ohřivačů větru přináší obr.5.

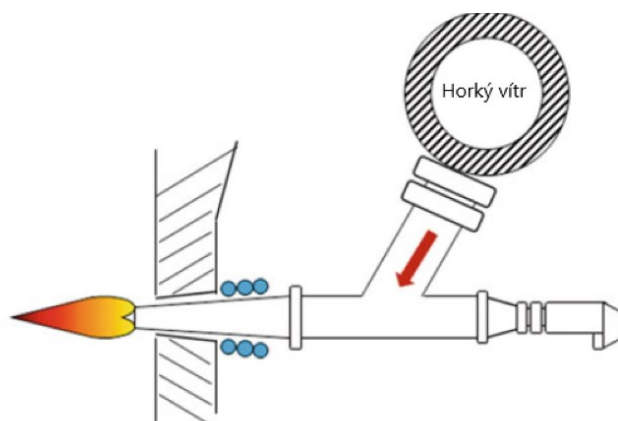


Obr.5 Schéma systému ohřivačů větru [14]

Horký plyn (kolem $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$) lze regenerovat za účelem předehřátí plynu nebo vzduchu přiváděného do ohřivače větru. Úspora energie vede ke zvýšení účinnosti až o 8 %. Toto zařízení pak využívá citelné teplo spalin vznikajících při ohřevu v ohřivačích větru k předehřívání spalovacího vzduchu a topného plynu pro následné vytápění [14] a skládá se ze dvou výměníků tepla. Jedním z nich je boční výměník tepla přijímající teplo, který přijímá spaliny vypouštěné z ohřivačů větru; druhý výměník tepla je na topné straně a ten předehřívá spalovací vzduch a topný plyn pomocí citelného tepla, přijímaného tepelným výměníkem na straně příjmu tepla. Míra rekuperace citelného tepla spalin z tohoto zařízení je 40–50 %. Úspora energie je až do $0,3 \text{ GJ.t}^{-1}$ tekutého surového železa.

Režim obohacování kyslíkem je fixní při daném objemu větru, tedy průtok horkého vzduchu je udržován konstantní. K větru je přidáván kyslík za vzniku směsi vzduchu a kyslíku, což vede ke změně složení plynu ve výfučnách. Průsada koksu klesá o 5 kg.t^{-1} a produkce se

zvýší o 3,3%, když se poměr obohacení kyslíkem zvýší o 1%.[15] Zjednodušené schéma dmýchání horkého větru do vysoké pece přináší obr.6.



Obr.6 Dmýchání horkého větru [1]

Po obohacení kyslíkem dochází ke změně poměrů, typické parametry při obohacení kyslíkem jsou uvedeny v tabulce 1. Poměr obohacování kyslíkem byl od 1% do 5% v kroku po 1%. [15]

Tab.1 Parametry pochodu při obohacení kyslíkem [15]

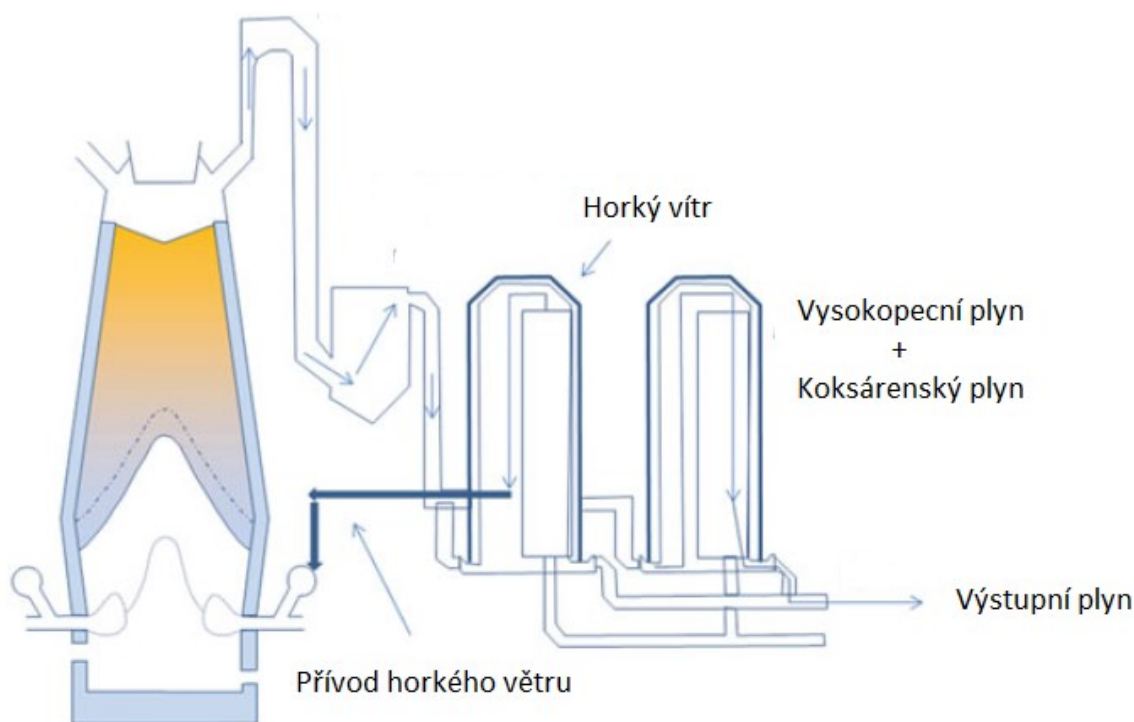
Poměr obohacení kyslíkem	0%	1%	2%	3%	4%	5%
Produkce [t.d^{-1}]	4431	4577	4723	4869	5015	5161
Spotřeba koksu [kg.t^{-1}]	462	457	452	447	442	437
Spotřeba uhlí [kg.t^{-1}]	97	105	113	121	129	137

Spotřeba koksu se také zvyšuje po zvlhčení větru. Dle praktických zkušeností spotřeba koksu se po zvlhčení sníží o 1 kg.t^{-1} , pokud se množství vlhčeného větru zvyšuje o 1 g.m^{-3} . Množství vlhčeného větru je od 10 g.m^{-3} do 30 g.m^{-3} v případě 5 g.m^{-3} . Na každých 5 g.m^{-3} zvýšení vlhkosti větru se míra obohacování kyslíkem zvyšuje o 0,45% a produkce se zvýší o 132 tun, zatímco spotřeba uhlí se nemění. Typické parametry při změně vlhčení větru jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab.2 Typické parametry při změně množství vlhčeného větru [15]

Množství vlhčeného větru	5 g.m^{-3}	10 g.m^{-3}	15 g.m^{-3}	20 g.m^{-3}	25 g.m^{-3}	30 g.m^{-3}
Produkce [t.d^{-1}]	4431	4563	4695	4827	4959	5091
Spotřeba koksu [kg.t^{-1}]	462	467	472	477	482	487
Spotřeba uhlí [kg.t^{-1}]	97	89	82	75	68	61
Poměr obohacení kyslíkem [%]	0	0.45	0.90	1.34	1.80	2.25

Předeřátému vzduchu je označován pojmem vysokopecní vítr. Vyšší teplota větru povede k nižší spotřebě koksu ve vysokopecním provozu, proto se sníží spotřeba energie a emise CO_2 z vysoké pece. Ohřívače větru fungují jako protiproudé regenerativní výměníky tepla. Využívají obvykle nízkokalorický vysokopecní plyn v kombinaci s koksárenským plynem s vyšší výhřevností, viz. obr.7.



Obr.7 Využití vysokopecního horkého větru [5]

Výměna tepla probíhá nejintenzivněji ve spodní části pece a tento proces určuje kvalitu kovu a výrobní parametry pochodu. Velmi specifickou roli hraje oxidační oblast, přestože její celkový objem představuje pouze 1 % objemu vysoké pece, přesto velká část tepla i chemické energie potřebné pro výrobu surového železa vzniká zde. Rozsah oxidační oblasti je vedle kapacity kohezivní zóny pro prostup plynu určující z hlediska výrobnosti pece [5].

Ekonomické a ekologické podmínky podnítily řadu změn, zejména v posledních dekádách. Lepší distribuce vsázky, kvalitnější aglomerát a pelety, jež dnes tvoří 80 – 100 % vsázky, zvýšení tlaku na sazebně a vysoké teploty větru ($1200 - 1300^\circ\text{C}$) vyústily ve značné zvýšení výrobnosti pece a snížení spotřeby koksu. Injektáž náhradních paliv/redukovadel jako olej, zemní plyn a prachové uhlí se projevuje dalším snížením spotřeby koksu. Snížení spotřeby koksu vede mimo jiné i ke snížení množství emisí oxidu uhličitého [5].

2 VÝPOČET ZTRÁTY TEPLoty HORKÉHO VĚTRU DMYŠNÝMI ELEMENTY VYSOKÉ PECE

Teplota větru při vstupu do spalovacího prostoru má podstatný vliv jak na spalovací teplotu, tak tepelné poměry v nístěji vysoké pece. Ty významně ovlivňují spotřebu koksu. Pokles teploty větru před vstupem do spalovacího prostoru závisí nejen na konstrukčních ukazatelích dmyšné soupravy, ale také na technologické úrovni vysokopecního pochodu a může se u různých výrobních jednotek lišit.

2.1 Popis dmyšných elementů

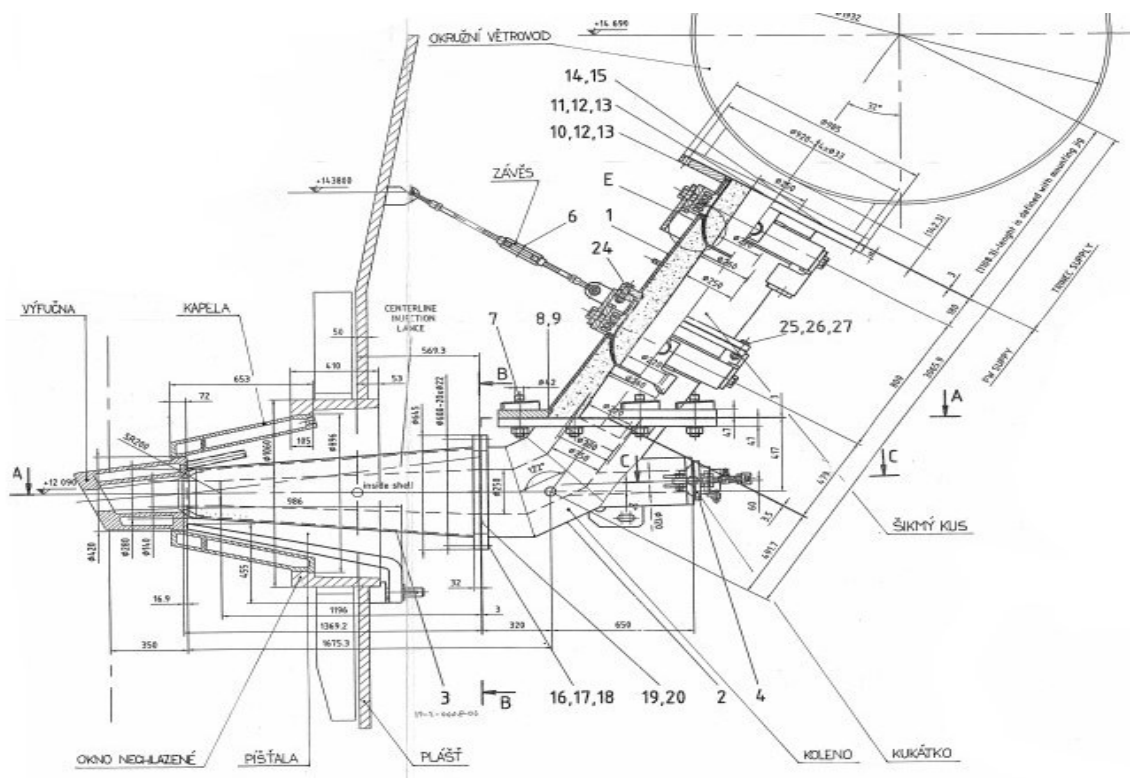
Na provozu vysokých pecí hutního podniku bylo započato se zkouškou izolace dmyšných elementů (tzv. dmyšných armatur) pomocí izolace, která je do těchto dmyšných elementů nalepena (obr.8) a následně zalita nízkocementovým žárobetonem. Dmyšné armatury jsou vyrobeny z konstrukční oceli S 235JR (11375) tloušťky 12 mm, jedná se o běžnou konstrukční ocel používající se pro staticky a dynamicky namáhané svařované konstrukce.



Obr.8 Izolované armatury – píšťala a koleno

Izolaci tvořil mikroporézní tepelně - izolační materiál s velmi nízkou hodnotou tepelné vodivosti, skládající se z anorganických silikátů, určený nejčastěji k použití jako vnější tepelná izolace v hutním a slévárenském průmyslu, s maximální aplikační teplotou do 1100 °C.

Žárovbeton je nízkocementový, určený pro žáruvzdorné výplně kovových konstrukcí, do teplot dosahujících 1500°C. Po následném vytvrdnutí takto upravených elementů, došlo k nabudování těchto armatur do dmyšné soustavy (obr.9).



Obr.9 Souprava dmyšných elementů vysoké pece [16]

Celá dmyšná souprava armatur vysoké pece se skládá z kompenzátoru (tzv. šikmého kusu), kolena a pišťaly, jenž je napojena na okružní horkovětrné potrubí, sloužící pro přívod ohřátého horkého větru z ohřivačů větru do výfucen vysoké pece. Dmyšná souprava je k plášti vysoké pece přichycena pružným závěsem, který umožňuje vyrovnávat tepelné dilatace. U dmyšných souprav nového typu jsou tepelné dilatace vyrovnávány pomocí kompenzátorů [16].

Jednotlivé dmyšné elementy jsou nabudovány v různých časových intervalech a dle předpokládané životnosti a vzniklého opotřebení těchto dmyšných elementů jsou během provozu vysoké pece preventivně vyměňovány, aby nedošlo k poruchovým stavům či haváriím s následnými poruchami chodu pece. Proto byly pro porovnání měření vybrány dvě dmyšné soupravy s přibližně stejnou dobou životnosti, aby byla měření srovnatelná.

Takto sestavená dmyšná souprava byla jako celek nabudována dne 17.12.2020 na výfuchu č.14 s tepelnou izolací a na výfuchu č.8 bez této izolace, pro zahájení pokusného měření ztráty tepla mezi těmito dvěma druhy dmyšných souprav (elementů). Vysoká pec

v daném hutním podniku pracuje s dvaceti výfučnými a dmyšnými soupravami, tzn. že ostatních devatenáct dmyšných souprav je bez tepelné izolace.

Pro následné měření a porovnání výpočtu ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy, bez izolační vrstvy a s izolační vrstvou, byl použit vizuální infračervený teploměr značky Flir – E64501, fungující jako klasický pyrometr s dvoubodovým laserem, jehož prostřednictvím lze přesně lokalizovat oblast, v níž je přístrojem měřena teplota [17] (obr.9). Obrázky zobrazují nejvyšší tepelný bod zjištěný během měření na dmyšných elementech.



Obr.10 Snímky z termokamery [17]

Takto izolované dmyšné elementy mají být přínosným krokem pro úsporu tepelné energie při dmýchání horkého větru přes tyto dmyšné soupravy. Pro plánované propočty bylo nutno provést tímto infrateploměrem měření povrchové teploty jednotlivých dmyšných elementů za provozních podmínek. Vzhledem ke skutečnosti, že infrateploměr bylo nutno pro každé měření zapůjčit a vzhledem k náročnosti měření teploty u jednotlivých elementů, byl rozsah měření stanoven na dvanáct měření.

Tím, že měření probíhalo v reálných provozních podmínkách, v rozsahu 3 měsíců. Tyto podmínky byly ovlivněny požadavky provozu tzn., že během těchto měření byly rozdíly v množství dmýchaného větru, teplotě horkého větru i množství kyslíku v dmýchaném větru. Proto vykazují naměřené hodnoty v níže uvedených tabulkách různých hodnot, provozními požadavky ovlivněnými.

Nejprve byl stanoven postup měření pro jednotlivé součásti. Poté byla provedena měření povrchové teploty jednotlivých dmyšných elementů infrateploměrem, tzn. měření povrchové teploty na kompenzátoru, koleně a píšťale za reálných a tedy různých hodnot dmýchaného větru, množství kyslíku v dmýchaném větru i při různé teplotě horkého větru. Naměřené hodnoty teploty za provozních podmínek pro každou součást (kompenzátor, píšťalu a koleno) infračerveným teploměrem přináší následující tab. 3, tab.4 a tab.5.

Tab.3 Naměřené hodnoty pro kompenzátor za provozních podmínek

č.měření	fouk.	THV	O ₂	M _{PU}	Kompen.	Kompen.iz.
	tis.m ³ .hod ⁻¹	°C	m ³ .h ⁻¹	t	°C	°C
1	130	1181	6700	19,8	314	251
2	130	1181	6250	18,6	320	242
3	130	1201	6100	19,1	310	238
4	130,5	1200	6090	18,6	299	262
5	120	1189	5200	17,7	295	245
6	135	1201	6500	19	331	264
7	135	1201	5800	19	336	265
8	135	1201	6000	18,8	328	262
9	135	1200	5900	19,2	330	265
10	135	1191	5500	18,6	317	264
11	139	1201	5600	19	309	252
12	135	1201	6000	19,5	330	257

Tab.4 Naměřené teploty pro koleno za provozních podmínek

č.měření	fouk.	THV	O ₂	M _{PU}	Koleno	Kolenoiz.
	tis.m ³ .hod ⁻¹	°C	m ³ .h ⁻¹	t	°C	°C
1	130	1181	6700	19,8	290	257
2	130	1181	6250	18,6	302	247
3	130	1201	6100	19,1	319	258
4	130,5	1200	6090	18,6	293	266
5	120	1189	5200	17,7	286	262
6	135	1201	6500	19	310	269
7	135	1201	5800	19	334	291
8	135	1201	6000	18,8	333	281
9	135	1200	5900	19,2	328	271
10	135	1191	5500	18,6	310	271
11	139	1201	5600	19	301	274
12	135	1201	6000	19,5	315	263

Měření hodnoty teploty u píšťaly infračerveným teploměrem probíhalo z důvodu zpřesnění informace o teplotě na dvou místech, a sice z pravé (Píšť.P.st) a levé strany (Píšť.L.st levé strany), výsledně použitá hodnota pro další výpočet je průměrem těchto dvou hodnot (Průměr), viz. tab.5.

Tab.5: Naměřené hodnoty pro píšťalu za provozních podmínek

č.měření	fouk.	THV	O ₂	M _{PU}	Píšť.L.st	Píšť.P.st	Průměr	Píšť.L.st	Píšť.P.st	Průměr
	tis.m ³ .hod ⁻¹	°C	m ³ .h ⁻¹	t	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	130	1181	6700	19,8	333	341	337	309	304	306,5
2	130	1181	6250	18,6	323	337	330	297	306	301,5
3	130	1201	6100	19,1	338	348	343	302	318	310
4	130,5	1200	6090	18,6	340	354	347	303	311	307
5	120	1189	5200	17,7	311	331	321	294	302	298
6	135	1201	6500	19	314	320	317	294	288	291
7	135	1201	5800	19	329	335	332	297	316	306,5
8	135	1201	6000	18,8	336	347	341,5	292	318	305
9	135	1200	5900	19,2	334	338	336	290	321	305,5
10	135	1191	5500	18,6	334	339	336,5	293	309	301
11	139	1201	5600	19	323	342	332,5	294	330	312
12	135	1201	6000	19,5	336	344	340	301	325	313

Protože měření teploty probíhalo v reálném provozu, množství dmýchaného větru se měnilo v rozsahu 120-139 tis.m³.hod⁻¹, teplota větru byla v rozmezí 1181-1201°C, množství kyslíku dle aktuální situace bylo v rozmezí 5200-6700 m³ za hodinu. Ve výše uvedených tabulkách je i informace o aktuálním množství prachového uhlí v tunách, které bylo v rozmezí 17,7-19,8 tun.

Dále byly stanoveny výchozí podmínky pro danou vysokou pec, poté výpočet povrchů dmyšných elementů a následně proveden výpočet tepelných ztrát.

2.2 Teoretické základy přestupu tepla

Ve vysoké peci při proudění ohřátého horkého větru z ohřívачů větru do dmyšných elementů dochází v potrubí ke ztrátám tepla do okolí. Ztráty jsou tím vyšší, čím vyšší je rychlost proudění média kolem potrubí a čím je vyšší teplota povrchu potrubí. Ztráty pak mají za následek chladnutí média v potrubí. Existují tři základní způsoby sdílení tepla, kterými se přenos tepelné energie uskutečňuje a to:

- konvekci (prouděním)
- kondukcí (vedením)
- sáláním (radiací)

2.2.1 Přestup tepla prouděním (konvekci)

Přestup tepla prouděním (konvekci) probíhá pohybem částic nejčastěji mezi pracovní látkou a stěnou. Na velikost přestupu tepla prouděním má vliv intenzita proudění. Pohyb tekutiny uvnitř potrubí může být způsobený uměle (např.: u vysoké pece turbodmychadlem) – nucená konvekce nebo rozdílem hustot v důsledku rozdílných teplot – přirozená konvekce [18].

Sdílení tepla prouděním vyjadřuje Newtonův zákon [19] ve tvaru:

$$q = \alpha \cdot (t - t_1) \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (3-1)$$

respektive

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (t - t_1) \quad (W) \quad (3-2)$$

Součinitel přestupu tepla α závisí jednak na typu proudění a jednak na geometrii kanálu a je obsažen v Nusseltově bezrozměrném kritériu [19]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_a} \quad (-) \quad (3-3)$$

Po vyjádření α :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{l} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (3-4)$$

2.2.2 Přestup tepla vedením (kondukcí)

Při tomto způsobu sdílení tepla přechází teplo od částice k částici jejich přímým stykem. K tepelné výměně dochází tím, že teplejší částice předávají energii chladnějším částicím. Při tomto ději se částice nepřemísťují, ale kmitají kolem vlastních rovnovážných poloh. Nejčastěji se sdílení tepla vedením šíří v pevných látkách, v jejichž částech jsou teploty různé a v tekutinách se vyskytuje pouze ve zvláštních případech (např.: v laminárním filmu tekutiny podél vnitřních stěn potrubí) [18].

Je-li děj ustálený, pak je rychlost tepla mezi jednotlivými částmi tělesa stálá, tudíž nezávislá na čase. Tepelný tok vedením je popsán Fourierovou rovnicí [18]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (3-5)$$

respektive

$$Q = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad}(t) \quad (W) \quad (3-6)$$

Tato rovnice udává přímou úměrnost mezi měrným tepelným tokem q (respektive tepelným tokem Q) a gradientem teplot v příslušném směru. Součinitel úměrnosti λ představuje tepelnou vodivost materiálu stěny ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) a závisí na typu materiálu a jeho teplotě.

Integrací této diferenciální rovnice lze získat vztah pro výpočet přeneseného tepelného toku pro složenou válcovou stěnu z n – vrstev, pro kterou platí vztah:

$$Q = \frac{2\pi L (t_{w1} - t_{wi+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} [W] \quad (3-7)$$

2.2.3 Přestup tepla sáláním (radiací)

U tohoto způsobu sdílení tepla je energie předávána prostorem pomocí elektromagnetického vlnění, jenž může být změněno na tepelnou energii a může tak zvýšit teplotu média, které záření absorbovalo. Každé těleso je schopné energii vyzařovat i vyzářenou energii přijímat. Energie, která se při dopadu projeví jako energie tepelná, se nazývá sálavá energie [19]. Tepelná energie sálaná na těleso se dle jeho povahy může pohltit nebo se může odrazit. Poměr pohlcené energie k dopadající energii určuje emisivita ε . Tento způsob přestupu tepla se uplatňuje hlavně u plynů při teplotě vyšší jak cca 400°C, a to zejména u dvouatomových plynů. Pro praktické výpočty ztrát tepla potrubí sáláním do okolí použijeme upravený Stefan-Boltzmannův zákon pro šedá (reálná) tělesa ve tvaru [20, 21]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4) [W] \quad (3-8)$$

Hodnota ε je emisivita reálného tělesa, která je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Materiály mají hodnotu emisivity mezi 0 a 1,0. Černé těleso má hodnotu vyzařování (emisivity) 1,0 a dokonalé odrazové sklo má hodnotu vyzařování 0. Emisivita materiálu je závislá na teplotě povrchu a konečném zpracování povrchu. Rovnice výměny energie mezi šedým tělesem a okolním médiem (3-8) předpokládá, že všechna energie vyzářená malým zářícím tělesem je absorbována okolním médiem. Při výpočtech izolací je nutné vypočítat celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně. Sálavý příspěvek tohoto součinitele se vypočte z určeného tepelného přestupu sáláním získaného z rovnice (3-8) a následným dopočítáním z Newtonovy rovnice přestupu tepla konvekcí (3-2).

2.2.4 Bezrozměrná kritéria

V této diplomové práci bude nutno při výpočtech přestupu tepla a výpočtu tepelných ztrát použít několik bezrozměrných kritérií, a sice při výpočtech součinitelů přestupu tepla. Jedná se o následující kritéria [22]:

• **Prandtlovo kritérium:** které je důležitým bezrozměrným kritériem používaným při výpočtech sdílení tepla, které zahrnuje vlastnosti média podstatné při molekulárním sdílení tepla.

Pro malé hodnoty Prandtlova čísla $Pr \ll 1$ (kapalina má menší viskozitu) probíhá převážně konvektivní (prouděním) přenos tepla v kapalině.

Pro velké hodnoty Prandtlova čísla $Pr \gg 1$ probíhá převážně konduktivní (vedením) přenos tepla v kapalině.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \eta}{\lambda_a} \quad (3-9)$$

• **Nusseltovo kritérium:** sloužící k získání součinitele přestupu tepla α . Pro vyjádření podobnosti přenosu tepla konvekcí a kondukcí v mezní vrstvě média.

Nusseltovo číslo blízké 1 značí, že konvekční složka a vodivostní složka jsou podobné velikosti a proudění je označováno jako laminární.

Větší Nusseltovo číslo odpovídá situaci, kdy je výraznější konvektivní složka, a proudění se označuje jako turbulentní, obvykle v rozsahu 100-1000.

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_n} \quad (3-10)$$

• **Grashofovo kritérium:** sloužící pro vyjádření intenzity cirkulace vlivem rozdílu teplot při přirozeném proudění média.

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (3-11)$$

2.3 Postup výpočtu ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy

Při započetí výpočtů ztráty teploty větru na základě provedených dvanácti měření bylo zapotřebí stanovení jednotlivých základních hodnot dmyšných elementů, a to jak z výkresové dokumentace, tak i hodnot z prováděných jednotlivých měření. Měření bylo prováděno za provozních podmínek během standartních chodů vysoké pece. To znamená, že měření nebylo možno provádět po, nebo před plánovanými nebo neplánovanými odstávkami a při nestandardních chodech vysoké pece, jelikož při zastavování a pak při následném zafoukávání, nebo při nestandardním chodu vysoké pece dochází ke značnému rozkolísání základních hodnot potřebných k výpočtu.

Pro určení ztráty teploty je nutno znát hodnoty:

- teploty horkého větru (THV),
- rychlost, množství a tlak dmýchaného větru,
- množství kyslíku pro obohacení dmýchaného větru,
- poklesu teplot plášťů jednotlivých dmyšných elementů.

Dále pak hodnoty z tabulek [24] pro kinematickou viskozitu vzduchu, tepelnou vodivost vzduchu, měrná tepelná kapacita a hustotu vzduchu. Vybrané vlastnosti vzduchu a kyslíku pro teploty potřebné k výpočtu přináší ve zkratce tab.6.

Tab.6 Vybrané vlastnosti vzduchu a kyslíku [24]

Fyzikální vlastnosti vzduchu				
teplota [°C]	kinem.viskozita ν [tis.m ⁻² .hod]	Tepel. vodivost λ [1000*W/(m*K)]	Měrné teplo c_p [kJ/(kg*K)]	Hustota ρ [kg.m ⁻³]
100	83,4	30,75	1,01	0,9465
120	91,35	32,08	1,0149	0,8983
140	99,56	33,39	1,0198	0,8549
160	108,03	34,68	1,0247	0,8154
180	116,75	35,94	1,0295	0,7794
200	125,7	37,17	1,0342	0,7465
220	134,89	38,39	1,0389	0,7162
240	144,31	39,58	1,0435	0,6883
260	153,95	40,75	1,048	0,6624
280	163,82	41,9	1,0525	0,6385
300	173,89	43,03	1,057	0,6162
320	184,18	44,14	1,0613	0,5954
Měrná entalpie kyslíku a vzduchu				
teplota [°C]	kyslík i [kJ.m ⁻³]	vzduch i [kJ.m ⁻³]		
1160	1652,91	1733,64		
1170	1668,48	1749,93		
1180	1684,07	1766,24		
1190	1699,68	1782,56		
1200	1715,31	1798,89		
1210	1730,96	1815,24		

Vyhodnocení bylo provedeno na základě měření povrchové teploty dmyšných elementů. Teplota na povrchu dmyšných elementů je přímo závislá na energii proudící skrz ně. Proto byly z hodnocení vyjmuty armatury, u kterých byla denní hodnota průtoku energie mimo rozmezí 200–250 GJ.den⁻¹ (počítáno na základě objemového průtoku dmýchaného větru). Tyto armatury jsou buď již příliš opotřeбенé nebo naopak zalité struskou, vliv má také požadované množství dmýchaného větru a jeho teplota. Rovněž byly z hodnocení vyjmuty odpichové armatury č. 1, 2, 19 a 20, které jsou ovlivněny sálavým teplem z hlavního odpichového žlabu.

Měřením povrchové teploty jednotlivých kusů dmyšných elementů byl prokázán průměrný pokles teploty kompenzátorů, kolen a píšťal izolovaných okolo 40°C.

Pro vlastní výpočet je potřeba znát jednotlivé povrchy dmyšných elementů, skladbu a tloušťku jednotlivých izolačních vrstev a jejich vodivosti. Vstupní data jsou uvedena v tabulce č.7 níže.

Tab.7 Hodnoty dmyšných elementů

Dmyšný element	Pancíř			Žárobeton		Izolace , t = (200-400°C)	
	Povrch	Tloušťka	Vodivost	ØTloušťka	Vodivost	Tloušťka	Vodivost
	[m ²]	[m]	[W/m.K]	[m]	[W/m.K]	[m]	[W/m.K]
Kompenzátor	2,315	0,012	45	0,198	1,50	0,005	0,023 – 0,028
Píšťala	1,68	0,012	45	0,076	1,50	0,005	0,023 – 0,028
Koleno	1,107	0,012	45	0,076	1,50	0,005	0,023 – 0,028

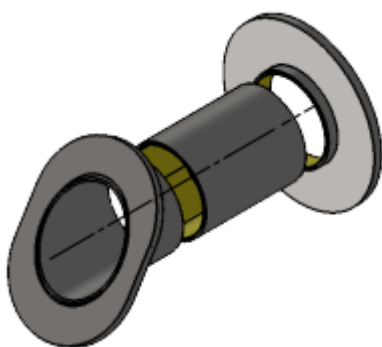
2.3.1 Výpočet povrchů jednotlivých dmyšných elementů

Nejprve bylo nutno stanovit povrch jednotlivých dmyšných elementů, tedy výpočtem stanovit povrch u kompenzátoru, kolena a píšťaly.

Výpočet kompenzátor

Prvým dmyšným elementem je kompenzátor, který je sestaven ze dvou segmentů, jak ilustruje obr.11. Výpočtem byl stanoven jeho povrch.[23]

Kompenzátor: (sestaven ze dvou segmentů)



$$S_{pl} = \pi \cdot d \cdot v_s \quad (3-12)$$

$$S_{pl1} = 3,14 \cdot 0,505 \cdot 0,980 = 1,555 \text{ m}^2$$

$$S_{pl2} = 3,14 \cdot 0,505 \cdot 0,479 = 0,76 \text{ m}^2$$

$$S_{pl} = S_{pl1} + S_{pl2} = 2,315 \text{ m}^2$$

$$S_{pl} = \mathbf{2,315 \text{ m}^2}$$

Obr.11 Kompenzátor

Výpočet koleno (šikmý kus)

Druhým dmyšným elementem je koleno, které je sestaveno ze tří segmentů, jak ukazuje obr.12. Výpočtem byl stanoven jeho povrch.

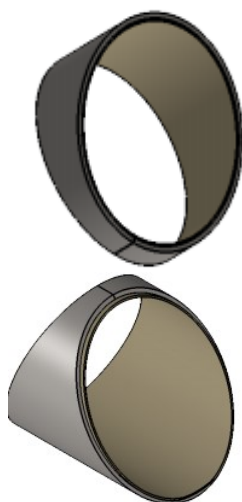
Koleno: (sestaveno se tří segmentů)



$$S_{pl} = \pi \cdot r \cdot (v_1 + v_2) \quad (3-13)$$

$$S_{pl1} = \pi \cdot r \cdot (v_1 + v_2)$$

$$S_{pl1} = 3,14 \cdot 252,5 \cdot (62 + 238) = 0,238 \text{ m}^2$$



Obr. 12 Sestava kolena

$$S_{pl2} = \pi \cdot r \cdot (v1+v2)$$

$$S_{pl2} = 3,14 \cdot 252,5 \cdot (105+388) = 0,391 \text{ m}^2$$

$$S_{pl3} = \pi \cdot r \cdot (v1+v2)$$

$$S_{pl3} = 3,14 \cdot 252,5 \cdot (71+532) = 0,478 \text{ m}^2$$

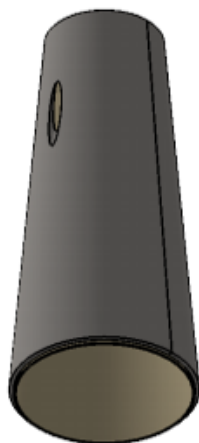
$$S_{pl} = S_{pl1} + S_{pl2} + S_{pl3} = 1,107 \text{ m}^2$$

$$S_{pl} = \mathbf{1,107 \text{ m}^2}$$

Výpočet píšťala

Třetím dmyšným elementem je píšťala, která se skládá ze dvou segmentů, jak ukazuje obr.13. Níže je proveden výpočet obsahu pláště píšťaly.

Píšťala: (sestavena ze dvou segmentů)



$$S_{pl} = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s \quad (3-14)$$

$$s = c \rightarrow s^2 = c^2 = a^2 + b^2 \quad (3-15)$$

$$s = c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

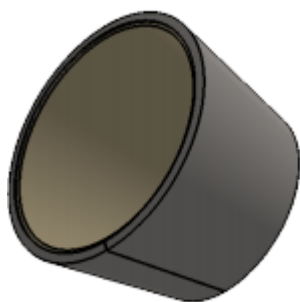
$$s = c = \sqrt{93,8^2 + 1164^2}$$

$$s = 1167,77 \text{ mm}$$

$$S_{pl1} = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s_1$$

$$S_{pl1} = 3,14 \cdot (252,5 + 158,7) \cdot 1167,7$$

$$S_{pl1} = 1\,508\,552 \text{ mm}^2 = 1,508 \text{ m}^2$$



Obr.13 Píšťala

$$s = c \rightarrow s^2 = c^2 = a^2 + b^2$$

$$s = c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$s = c = \sqrt{38,52 + 1932}$$

$$s = 196,8 \text{ mm}$$

$$S_{pl2} = \pi \cdot (r_1 + r_2) \cdot s_1$$

$$S_{pl2} = 3,14 \cdot (120 + 158,7) \cdot 196,8$$

$$S_{pl2} = 172\,186,92 \text{ mm}^2 = 0,172 \text{ m}^2$$

$$S_{pl} = S_{pl1} + S_{pl2} = 1,508 + 0,172$$

$$S_{pl} = 1,68 \text{ m}^2$$

2.3.2 Výpočet tepelných ztrát na píšťale

Pro výpočet tepelných ztrát na píšťale byl přijat zjednodušující předpoklad a sice horizontální tvar válce. Výpočet se skládá z určení výchozích podmínek pro píšťalu bez izolace a píšťalu s izolací a následného výpočtu pro obě varianty. Výpočet byl proveden v Excel (viz. příloha č.1) pro všech 12 měření, níže bude uveden postup výpočtu pro měření č.1.

Konstantní pro všechny výpočty zůstávají rozměrové hodnoty (vnější poloměr píšťaly a již výpočteně stanovený obsah pláště píšťaly) a teplota okolního prostředí.

Výchozí podmínky:

Píšťala bez izolace

Píšťala s izolací

$$r_2 = 196,16 \text{ mm} \quad \leftarrow \text{vnější poloměr píšťaly} \rightarrow \quad r_2 = 196,16 \text{ mm}$$

$$t_{w2} = 337 \text{ °C} \quad \leftarrow \text{teplota pláště píšťaly} \rightarrow \quad t_{w2} = 306,5 \text{ °C}$$

$$t_a = 20 \text{ °C} \quad \leftarrow \text{teplota okolního vzduchu} \rightarrow \quad t_a = 20 \text{ °C}$$

$$S = 1,68 \text{ m}^2 \quad \leftarrow \text{obsah pláště píšťaly} \rightarrow \quad S = 1,68 \text{ m}^2$$

Vlastní výpočet:

Píšťala bez izolace

Píšťala s izolací

$$t_{st} = \text{střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)} (\text{°C})$$

$$t_{st} = (t_{w2} + t_a)/2 = 178,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{st} = (t_{w2} + t_a)/2 = 163,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ν = kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st}) [24] ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\nu = 3,22489 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\nu = 3,04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

λ = součinitel tepelné vodivosti vzduchu (pro t_{st}) [24] ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\lambda = 0,0358456 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 0,034885 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_p = měrná tepelná kapacita vzduchu (pro t_{st}) [24] ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$c_p = 1029,14 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_p = 1025,48 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

ρ = hustota vzduchu (pro t_{st}) [24] ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$\rho = 0,7821 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho = 0,80955 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pr = Prandtlovo kritérium vztah [25] (-)

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho / \lambda \quad (3-16)$$

$$Pr = 0,724$$

$$Pr = 0,723$$

Gr = Grashofovo kritérium [25] (-)

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2} \quad (3-17)$$

g – tíhové zrychlení ($9,780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

l = charakteristická rozměr (vnější průměr) (m)

β = součinitel tepelné roztažnosti, vztažen k t_{st} ($1 \cdot \text{K}^{-1}$)

$$Gr = 4,00 \cdot 10^8$$

$$Gr = 4,21 \cdot 10^8$$

Součin $Pr \cdot Gr$

$$Pr \cdot Gr = 2,89 \cdot 10^8$$

$$Pr \cdot Gr = 3,04 \cdot 10^8$$

Je-li součin $Gr \cdot Pr$ a je v rozsahu $10^{-5} \leq GrPr \leq 10^{12}$, pro $0,00001 \leq GrPr \leq 1000000000000$, pak použijeme Nu = Nusseltovo kritérium [26] (-), kdy platí vztah:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (3-18)$$

$$Nu = 78,78106$$

$$Nu = 80,01168$$

α_k = součinitel přestupu tepla konvekcí ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / (2 \cdot r_2 / 1000) \quad (3-19)$$

$$\alpha_k = 7,198069$$

$$\alpha_k = 7,114568$$

ε = poměrná pohltivost – emisivita [27] (-)

$$\varepsilon = 0,95$$

$$\varepsilon = 0,95$$

σ = Stefan-Boltzmannova konstanta [27] ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

Q_s = přestup tepla sáláním (W)

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot [(t_{w2} + 273,15)^4 - (t_a + 273,15)^4] \quad (3-20)$$

$$Q_s = 11873,57$$

$$Q_s = 9547,657$$

α_s = součinitel přestupu tepla sáláním ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_s = Q_s / [S \cdot (t_{w2} - t_a)] \quad (3-21)$$

$$\alpha_s = 22,29527$$

$$\alpha_s = 19,8364$$

α_0 = celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s \quad (3-22)$$

$$\alpha_0 = 29,49334$$

$$\alpha_0 = 26,95097$$

Q = celková tepelná ztráta (W)

$$Q = \alpha_0 \cdot S \cdot (t_{w2} - t_a) \quad (3-24)$$

$$Q = 15706,97 \text{ W}$$

$$Q = 12972,04 \text{ W}$$

Q – celková tepelná ztráta ($\text{GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$)

$$1 \text{ GJ} = 277777.7777778 \text{ Wh} = Q / 277777.7777778$$

$$Q = 3600 \cdot Q / 1000000000$$

$$Q = 0,056545 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

$$Q = 0,046699 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Q – celková tepelná ztráta ($\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}$)

$$Q = Q [\text{W}] \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 / 3600000$$

$$Q = 377 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

$$Q = 311 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

Výsledky výpočtů a jejich srovnání pro následujících 11 měření, které byly provedeny v Excelu (viz. příloha č.1) jsou uvedeny v tab. 8.

Tab.8 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na pístěle s izolací a bez izolace

Číslo měření	Pístěla bez izolace		Pístěla s izolací	
	Teplota $[\text{°C}]$	Celk. tepelná ztráta $[\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}]$	Teplota $[\text{°C}]$	Celk. tepelná ztráta $[\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}]$
1	337	376,97	306,5	311,33
2	330	377,31	301,5	301,36
3	343	390,91	310	318,43
4	347	400,41	307	312,33
5	321	341,47	298	294,52
6	317	332,97	291	281,15
7	332	365,62	306,5	311,33
8	341,5	387,39	305	308,32
9	336	374,68	305,5	309,32
10	336,5	375,82	301	300,38
11	332,5	366,74	312	322,54
12	340	383,89	313	324,61

Vypočtené hodnoty Q - celková tepelná ztráta, jsou pro jednotlivé naměřené teploty ve výsledku přepočteny na jednotku ($\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}$), neboť v této jednotce je uváděna i produkce vysoké pece. Hodnoty jsou pro přehlednost zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

2.3.3 Výpočet tepelných ztrát na koleně

Pro výpočet tepelných ztrát na koleně byl opět přijat zjednodušující předpoklad a sice horizontální tvar válce. Výpočet se skládá z určení výchozích podmínek pro koleno bez izolace a koleno s izolací a následného výpočtu pro obě varianty. Výpočet byl proveden v Excel (viz. příloha č.2) pro všech 12 měření, níže bude uveden výpočet pro měření číslo 1. Konstantní pro všechny výpočty opět zůstávají rozměrové hodnoty (vnější poloměr kolena a již výpočetně stanovený obsah pláště kolena) a teplota okolního vzduchu.

Výchozí podmínky:

Koleno bez izolace	Koleno s izolací
--------------------	------------------

$r_2 = 252,5 \text{ mm}$	← vnější poloměr kolene →	$r_2 = 252,5 \text{ mm}$
--------------------------	---------------------------	--------------------------

$t_{w2} = 290 \text{ °C}$	← teplota pláště kolene →	$t_{w2} = 257 \text{ °C}$
---------------------------	---------------------------	---------------------------

$t_a = 20 \text{ °C}$	← teplota okolního vzduchu →	$t_a = 20 \text{ °C}$
-----------------------	------------------------------	-----------------------

$S = 1,107 \text{ m}^2$	← obsah pláště kolene →	$S = 1,107 \text{ m}^2$
-------------------------	-------------------------	-------------------------

Vlastní výpočet:

Koleno bez izolace	Koleno s izolací
--------------------	------------------

t_{st} = střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu) ($^{\circ}\text{C}$)

$t_{st} = (t_{w2} + t_a)/2 = 155 \text{ °C}$

$t_{st} = (t_{w2} + t_a)/2 = 138,5 \text{ °C}$

ν = kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st}) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$\nu = 2,94 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$\nu = 2,75 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

λ = součinitel tepelné vodivosti vzduchu (pro t_{st}) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$\lambda = 0,034358 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$\lambda = 0,033292 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

c_p = měrná tepelná kapacita vzduchu (pro t_{st}) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$c_p = 1023,475 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$c_p = 1019,43 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ρ = hustota vzduchu (pro t_{st}) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$$\rho = 0,825275 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\rho = 0,858155 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Pr = Prandtlovo kritérium (-)

$$Pr = v \cdot c_p \cdot \rho / \lambda$$

$$Pr = 0,723$$

$$Pr = 0,722$$

Gr = Grashofovo kritérium (-)

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$$

g – tíhové zrychlení ($9,780 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

l = charakteristická rozměr (vnější průměr) (m)

β = součinitel tepelné roztažnosti, vztažen k t_{st} ($1\cdot\text{K}^{-1}$)

$$Gr = 9,20\cdot 10^8$$

$$Gr = 9,63\cdot 10^8$$

Součin $Pr \cdot Gr$

$$Pr \cdot Gr = 6,66\cdot 10^8$$

$$Pr \cdot Gr = 6,95\cdot 10^8$$

Je-li součin $Gr\cdot Pr$ je v rozsahu $10^{-5} \leq GrPr \leq 10^{12}$, pro $0,00001 \leq GrPr \leq 1000000000000$, pak použijeme Nu = Nusseltovo kritérium (-), kdy platí vztah:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2$$

$$Nu = 102,1563$$

$$Nu = 103,5417$$

α_k = součinitel přestupu tepla konvekcí ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda \cdot / (2 \cdot r/1000)$$

$$\alpha_k = 6,950171$$

$$\alpha_k = 6,825907$$

ε = poměrná pohltivost – emisivita (-)

$$\varepsilon = 0,95$$

$$\varepsilon = 0,95$$

σ = Stefan-Boltzmannova konstanta ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

Q_s = přestup tepla sáláním (W)

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot [(t_{w2} + 273,15)^4 - (t_a + 273,15)^4]$$

$$Q_s = 5556,863$$

$$Q_s = 4269,942$$

α_s = součinitel přestupu tepla sáláním ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\alpha_s = Q_s / [S \cdot (t_{w2} - t_a)]$$

$$\alpha_s = 18,59167$$

$$\alpha_s = 23,1011$$

α_0 = celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s$$

$$\alpha_0 = 25,54184$$

$$\alpha_0 = 17,10497$$

Q = celková tepelná ztráta (W)

$$Q = \alpha_0 \cdot S \cdot (t_{w2} - t_a)$$

$$Q = 7634,20 \text{ W}$$

$$Q = 6060,78 \text{ W}$$

Q = celková tepelná ztráta ($\text{GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$)

$$Q = 3600 \cdot Q / 1000000000$$

$$Q = 0,027483 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

$$Q = 0,021819 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

Q = celková tepelná ztráta ($\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}$)

$$Q = Q[\text{W}] \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 / 3600000$$

$$Q = 183 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

$$Q = 145 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

Výsledky výpočtů a jejich srovnání pro následujících 11 měření, které byly provedeny v Excelu (viz příloha č. 2) jsou uvedeny v tab. 9.

Tab.9 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na koleně s izolací a bez izolace

Číslo měření	Koleno bez izolace		Koleno s izolací	
	Teplota [°C]	Celk. tepelná ztráta [kWh·den ⁻¹]	Teplota [°C]	Celk. tepelná ztráta [kWh·den ⁻¹]
1	290	183,22	257	145,46
2	302	198,39	247	135,10
3	319	221,29	258	146,52
4	293	186,94	296	155,21
5	286	178,34	262	150,82
6	310	208,96	291	158,55
7	334	242,93	291	184,45
8	333	241,45	281	172,36
9.	328	234,11	271	160,80
10	310	208,96	271	160,80
11	301	197,09	274	164,21
12.	315	215,75	263	151,91

Vypočtené hodnoty Q jsou pro jednotlivé naměřené teploty ve výsledku přepočteny na jednotku (kWh·den⁻¹), neboť v této jednotce je uváděna i produkce vysoké pece. Hodnoty jsou pro přehlednost zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

2.3.4 Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru

I pro tento výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru byl přijat zjednodušující předpoklad a sice horizontální tvar válce. Výpočet se opět skládá z určení výchozích podmínek pro kompenzátor bez izolace a kompenzátor s izolací a následného výpočtu pro obě varianty. Výpočet byl proveden v Excel (viz. příloha č.3) pro všech 12 měření, níže bude uveden výpočet pro měření č.1. Konstantní pro všechny výpočty opět zůstávají rozměrové hodnoty (vnější poloměr kompenzátoru a již výpočtetně stanovený obsah pláště kompenzátoru) a teplota okolního vzduchu.

Výchozí podmínky:

Kompenzátor bez izolace

Kompenzátor s izolací

$r_2 = 252,5 \text{ mm}$ ← vnější poloměr kompenzátoru → $r_2 = 252,5 \text{ mm}$

$t_{w2} = 314 \text{ °C}$ ← teplota pláště kompenzátoru → $t_{w2} = 251 \text{ °C}$

$t_a = 20 \text{ °C}$ ← teplota okolního vzduchu → $t_a = 20 \text{ °C}$

$$S = 2,315 \text{ m}^2 \quad \leftarrow \text{obsah pláště kompenzátoru} \rightarrow S = 2,315 \text{ m}^2$$

Vlastní výpočet:

Kompenzátor bez izolace

Kompenzátor s izolací

t_{st} = střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu) ($^{\circ}\text{C}$)

$$t_{st} = (t_{w2} + t_a) / 2 = 167 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{st} = (t_{w2} + t_a) / 2 = 135,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ν = kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st}) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\nu = 3,08561 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\nu = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

λ = součinitel tepelné vodivosti vzduchu (pro t_{st}) ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\lambda = 0,035121 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 0,033095 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_p = měrná tepelná kapacita vzduchu (pro t_{st}) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$c_p = 1026,38 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_p = 1018,698 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

ρ = hustota vzduchu (pro t_{st}) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$\rho = 0,8028 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho = 0,864665 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pr = Prandtlovo kritérium (-)

$$Pr = \nu \cdot c_p \cdot \rho / \lambda$$

$$Pr = 0,724$$

$$Pr = 0,722$$

Gr = Grashofovo kritérium (-)

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$$

g – tíhové zrychlení ($9,780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

l = charakteristická rozměr (vnější průměr) (m)

β = součinitel tepelné roztažnosti, vztažen k t_{st} ($1 \cdot \text{K}^{-1}$)

$$Gr = 8,86 \cdot 10^8$$

$$Gr = 9,69 \cdot 10^8$$

Součin $Pr \cdot Gr$

$$Pr \cdot Gr = 6,42 \cdot 10^8$$

$$Pr \cdot Gr = 7,00 \cdot 10^8$$

Je-li součin $Gr \cdot Pr$ je v rozsahu $10^5 \leq GrPr \leq 10^{12}$, pro $0,00001 \leq GrPr \leq 1000000000000$, pak použijeme Nu = Nusseltovo kritérium (-), kdy platí vztah:

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387(GrPr)^{1/6}}{\left(1 + 0,721 \left(\frac{1}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2$$

$$Nu = 100,9947958$$

$$Nu = 103,7712$$

α_k = součinitel přestupu tepla konvekci ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / (2 \cdot r_2 / 1000)$$

$$\alpha_k = 7,023838064$$

$$\alpha_k = 6,800663$$

ε = poměrná pohltivost – emisivita (-)

$$\varepsilon = 0,95$$

$$\varepsilon = 0,95$$

σ = Stefan-Boltzmannova konstanta ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

Q_s = přestup tepla sáláním (W)

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot [(t_{w2} + 273,15)^4 - (t_a + 273,15)^4]$$

$$Q_s = 13899,28494$$

$$Q_s = 8491,049$$

α_s = součinitel přestupu tepla sáláním ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_s = Q_s / [S \cdot (t_{w2} - t_a)]$$

$$\alpha_s = 20,42180536$$

$$\alpha_s = 15,87809$$

α_0 = celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s$$

$$\alpha_0 = 27,44564342$$

$$\alpha_0 = 22,67876$$

Q = celková tepelná ztráta (W)

$$Q = \alpha_0 \cdot S \cdot (t_{w2} - t_a)$$

$$Q = 18679,78 \text{ W}$$

$$Q = 12127,81 \text{ W}$$

$$Q = \text{celková tepelná ztráta (GJ} \cdot \text{hod}^{-1})$$

$$Q = 3600 \cdot Q / 1000000000$$

$$Q = 0,067247206 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

$$Q = 0,04366 \text{ GJ} \cdot \text{hod}^{-1}$$

$$Q = \text{celková tepelná ztráta (kWh} \cdot \text{den}^{-1})$$

$$Q = Q[\text{W}] \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 / 3600000$$

$$Q = 448 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

$$Q = 291 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

Výsledky výpočtů a jejich srovnání pro následujících 11 měření, které byly provedeny v Excelu (viz příloha č. 3) jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na kompenzátoru s izolací a bez izolace

Číslo měření	Kompenzátor bez izolace		Kompenzátor s izolací	
	Teplota [°C]	Celk. tepelná ztráta [kWh·den ⁻¹]	Teplota [°C]	Celk. tepelná ztráta [kWh·den ⁻¹]
1	314	448,31	251	291,07
2	320	465,70	242	272,05
3	310	436,97	238	263,85
4	299	406,78	262	315,41
5	295	396,17	245	278,30
6	331	498,74	264	319,97
7	336	514,28	265	322,27
8	328	489,58	262	315,41
9.	330	495,67	265	322,27
10	317	456,95	264	319,97
11	309	434,17	252	293,23
12.	330	495,67	257	304,19

Vypočtené hodnoty Q jsou pro jednotlivé naměřené opěti ve výsledku přepočteny na jednotku (kWh·den⁻¹). Hodnoty jsou pro přehlednost zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

2.3.5 Výpočet poklesu teploty horkého větru za dmyšnými elementy

Po výpočtech celkové tepelné ztráty pro všechny tři sledované dmyšné elementy (ve variantě s izolací a bez izolace) byl proveden výpočet poklesu teploty horkého větru za dmyšnými elementy. Výpočet byl proveden v Excel (viz. příloha č.4) pro všech 12 měření, níže bude uveden ilustrativní výpočet pro měření číslo 1.

Výchozí podmínky:

- VHV = 130 000 m³·hod⁻¹ - množství horkého větru pro VP
 THV = 1181 °C - teplota horkého větru pro VP
 V_{O₂} = 6700 m³·hod⁻¹ - množství kyslíku v horkém větru
 V_v = 123 300 m³·hod⁻¹ - množství vzduchu v horkém větru

Výpočet:

Následně byla výpočtem stanovena měrná entalpie horkého větru [26] při zadané teplotě (THV = 1181°C) :

$$\begin{aligned} i_{O_2} &= 1685,631 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{ - měrná entalpie kyslíku při zadané teplotě} \\ i_{\text{vzduch}} &= 1767,872 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{ - měrná entalpie vzduchu při zadané teplotě} \\ i_{\text{HV}_0} &\text{ - měrná entalpie horkého větru při zadané teplotě} \\ i_{\text{HV}_0} &= (V_{O_2} \cdot i_{O_2} + V_v \cdot i_{\text{vzduch}}) / V_{\text{HV}} \quad (3-25) \\ i_{\text{HV}_0} &= 1763,633 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

Poté byl proveden výpočet měrné entalpie horkého větru po průchodu dmyšnými elementy:

H_(HV0) – entalpie množství horkého větru přes 1 výfučnu za 1 hodinu při teplotě před dmyšnými elementy

$$H_{(\text{HV}0)} = (i_{\text{HV}_0} \cdot V_{\text{HV}}) / 200000000 \quad (3-26)$$

$$H_{(\text{HV}0)} = 11,464 \text{ GJ}$$

H_(HV1) – entalpie množství horkého větru přes 1 výfučnu za 1 hodinu při teplotě za neizolovanými dmyšnými elementy

$$H_{(\text{HV}1)} = H_{(\text{HV}0)} - Q_{\text{píšťala neiz}} - Q_{\text{koleno neiz}} - Q_{\text{kompenzátor neiz}} \quad (3-27)$$

$$H_{(\text{HV}1)} = 11,312 \text{ GJ}$$

H_(HV2) – entalpie množství horkého větru přes 1 výfučnu za 1 hodinu při teplotě za izolovanými dmyšnými elementy

$$H_{(HV2)} = H_{(HV0)} - Q_{\text{píšťala iz.}} - Q_{\text{koleno iz.}} - Q_{\text{kompenzátor iz.}} \quad (3-28)$$

$$H_{(HV2)} = 11,351 \text{ GJ}$$

$i_{(HV_1)}$ - měrná entalpie horkého větru měrná entalpie horkého větru za neizolovanými dmyšnými elementy

$$i_{(HV_1)} = 1000000 \cdot H_{(HV1)} \cdot 20 / V_{HV} \quad (3-29)$$

$$i_{(HV_1)} = 1740,360 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$i_{(HV_2)}$ - měrná entalpie horkého větru měrná entalpie horkého větru za izolovanými dmyšnými elementy

$$i_{(HV_2)} = 1000000 \cdot H_{(HV2)} \cdot 20 / V_{HV} \quad (3-30)$$

$$i_{(HV_2)} = 1746,375 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Teplota horkého větru za dmyšnými elementy pro vypočtené měrné entalpie byla stanovena odečtením z tab. [25]:

$T_{(HV_1)}$ - teplota horkého větru za dmyšnými armaturami u neizolovaného potrubí (odečteno z tabulek)

$$T_{(HV_1)} = 1166,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$T_{(HV_2)}$ - teplota horkého větru za dmyšnými armaturami u izolovaného potrubí (odečteno z tabulek)

$$T_{(HV_2)} = 1170,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Následně byl výpočtem stanoven výsledný pokles teploty horkého větru za dmyšnými elementy a to jak pro armatury izolované, tak pro armatury neizolované, viz. ilustrativní propočet pro měření č. 1.

Δt_1 – pokles teploty horkého větru za neizolovanými dmyšnými armaturami

$$\Delta t_1 = T_{HV} - T_{(HV_1)}$$

$$\Delta t_1 = 14,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Δt_2 – pokles teploty horkého větru za izolovanými dmyšnými armaturami

$$\Delta t_2 = T_{HV} - T_{(HV_2)}$$

$$\Delta t_2 = 10,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výsledky následujících výpočtů, které byly provedeny a jejich srovnání pro následujících 11 měření, které byly provedeny v Excelu (viz. příloha č.4) jsou uvedeny ve dvou tabulkách z důvodu přehlednosti, a sice v tab.11 a v tab.12.

Tab.11 Výsledky výpočtu poklesu teploty větru 1

	tis.m ³ . hod ⁻¹	°C	m ³ .h ⁻¹	m ³ .hod ⁻¹	kJ.m ⁻³	kJ.m ⁻³	kJ.m ⁻³	GJ.hod ⁻¹	GJ.hod ⁻¹	GJ.hod ⁻¹
	fouk.	THV	O ₂	vzduch	i(O ₂)	i(vzdu)	i(HV0)	H(HV0)	H(HV1)	H(HV2)
1	130	1181	6700	123300	1685	1767	1763	11,46	11,31	11,35
2	130	1181	6250	123750	1685	1767	1763	11,47	11,31	11,36
3	130	1201	6100	123900	1716	1800	1796	11,68	11,52	11,57
4	130	1200	6090	124410	1715	1798	1794	11,71	11,56	11,59
5	120	1189	5200	114800	1698	1780	1777	10,66	10,53	10,56
6	135	1201	6500	128500	1716	1800	1796	12,13	11,97	12,01
7	135	1201	5800	129200	1716	1800	1796	12,13	11,96	12,01
8	135	1201	6000	129000	1716	1800	1796	12,13	11,96	12,01
9	135	1200	5900	129100	1715	1798	1795	12,12	11,95	11,99
10	135	1191	5500	129500	1701	1784	1780	12,02	11,86	11,90
11	135	1201	5600	129400	1716	1800	1797	12,13	11,98	12,01
12	135	1201	6000	129000	1716	1800	1796	12,13	11,96	12,01

Tab.12 Výsledky výpočtu poklesu teploty větru 2

	tis.m ³ . hod ⁻¹	°C	m ³ .h ⁻¹	m ³ .h ⁻¹	kJ.m ⁻³	kJ.m ⁻³	kJ.m ⁻³	kJ.m ⁻³	°C	°C	°C	°C
	fouk.	THV	O ₂	vzduch	i(O ₂)	i(vzd)	i(HV1)	i(HV2)	T _{HV1}	T _{HV2}	Δt ₁	Δt ₂
1	130	1181	6700	123300	1685	1767	1740,36	1746,38	1166,7	1170,4	14,3	10,6
2	130	1181	6250	123750	1685	1767	1739,89	1747,57	1166,2	1171,0	14,8	10,0
3	130	1201	6100	123900	1716	1800	1772,39	1779,78	1186,1	1190,7	14,9	10,3
4	130	1200	6090	124410	1715	1798	1772,14	1776,99	1186,0	1189,0	14,0	11,0
5	120	1189	5200	114800	1698	1780	1754,44	1759,25	1174,9	1177,9	14,1	11,1
6	135	1201	6500	128500	1716	1800	1773,37	1779,62	1186,8	1190,6	14,2	10,4
7	135	1201	5800	129200	1716	1800	1771,98	1778,75	1185,7	1189,8	15,3	11,2
8	135	1201	6000	129000	1716	1800	1771,95	1779,12	1185,7	1190,1	15,3	10,9
9	135	1200	5900	129100	1715	1798	1770,69	1777,63	1184,9	1189,2	15,1	10,8
10	135	1191	5500	129500	1701	1784	1757,66	1763,46	1176,8	1180,3	14,2	10,7
11	135	1201	5600	129400	1716	1800	1774,88	1779,72	1187,4	1190,4	13,6	10,6
12	135	1201	6000	129000	1716	1800	1772,47	1779,46	1186,1	1190,4	14,9	10,6

Výsledky všech měření na všech uvedených elementech a vypočtené hodnoty pro všech 12 měření, které byly provedeny v Excelu (viz příloha č. 5), přináší souhrnná tab. 13.

Tab.13 Souhrnné výsledky měření č.1–12

č.měření	fouk.	THV	O2	Q PU	Kompen.	Koleno	Píst'ala	Kompen.	Koleno	Píst'ala
	[m3/hod.]	[°C]	[m3/hod.]	[t/hod.]	neiz.[°C]	neiz.[°C]	neiz.[°C]	s iz.[°C]	s iz.[°C]	s iz.[°C]
1	130	1181	6700	19,8	314	290	337	251	257	306,5
2	130	1181	6250	18,6	320	302	330	242	247	301
3	130	1201	6100	19,1	310	319	343	238	258	310
4	130,5	1200	6090	18,6	299	293	347	262	266	307
5	120	1189	5200	17,7	295	286	321	245	262	298
6	135	1201	6500	19	331	310	317	264	269	297
7	135	1201	5800	19	336	334	332	265	291	306,5
8	135	1201	6000	18,8	328	333	341,5	262	281	305
9	135	1200	5900	19,2	330	328	336	265	271	305,5
10	135	1191	5500	18,6	317	310	336,5	264	271	301
11	139	1201	5600	19	309	301	332,5	252	274	312
12	135	1201	6000	19,5	330	315	340	257	263	313
Průměr	132,2	1195,2	5967,3	18,9	317,2	309,6	334,0	255,5	267,9	304,5
č.měření	Celk. ztráty tepla neiz.			Celk. ztráty tepla izol.			$\Delta t_{neiz.}$	$\Delta t_{iz.}$		
	[kWh/den]			[kWh/den]			[°C]	[°C]		
1	1009			748			14,3	10,6		
2	1041			709			14,8	10		
3	1049			729			14,9	10,3		
4	994			783			14	11		
5	916			724			14,1	11,1		
6	1041			760			14,2	10,4		
7	1123			818			15,3	11,2		
8	1118			796			15,3	10,9		
9	1104			792			15,1	10,8		
10	1042			781			14,2	10,7		
11	998			780			13,6	10,6		
12	1092			781			14,9	10,6		
Průměr	1044,2			766,6			14,6	10,7		

Jak vyplývá z uvedeného srovnání hodnot, teplotní rozdíl $\Delta t_{neiz.}$, tedy pokles teploty horkého větru za neizolovanými dmyšnými armaturami se pohyboval v rozmezí 13,6°C až 15,3°C, zatímco $\Delta t_{iz.}$, tedy pokles teploty horkého větru za izolovanými dmyšnými armaturami se pohyboval v rozmezí 10,0°C až 11,2°C.

3 VYHODNOCENÍ A PŘÍNOS V PRAXI

Intenzita dmýchání větru do vysoké pece a jeho teplota je důležitý faktor při utváření dynamické rovnováhy mezi postupnými, na sebe navazujícími termochemickými přeměnami a pro vzájemné proporce mezi mechanikou protiproudu a souborem všech ostatních (tepelných, termochemických a pyrometalurgických) dějů v čase a prostoru. Efektivnost chemického a tepelného působení plynu na vsázku se zvyšuje se zvyšováním intenzity proudění. Čím více se okamžitá intenzita přibližuje optimální hodnotě, tím hospodárněji pec pracuje z důvodů:

- zvýšení míry využití tepelné a chemické energie plynu,
- vzrůstu využití tepelné energie uhlíku v nístěži (tím dochází ke snížení měrné spotřeby koksu)
- vzrůstu výrobnosti pece rychlejším spalováním C_{koksu} (pokles jeho spotřeby)

Vzhledem ke zvyšujícím se požadavkům na úsporu energie v rámci vysokopecních procesů je pro průmyslovou praxi nutností identifikovat místa/oblasti, kde je možno úspory energie docílit. Jednou z těchto oblastí je i oblast přípravy a dmýchání horkého větru do vysoké pece. Při průchodu horkého větru větrovodem a následně při průchodu jednotlivými dmyšnými elementy dochází k tepelným ztrátám, což ve výsledku vede ke zvyšování nákladů na výrobu surového železa.

Teplota větru při vstupu do spalovacího prostoru s prokazatelným vlivem na měrnou spotřebu koksu je nižším následkem tepelných ztrát v potrubí horkého větru a ve vodou chlazených armaturách. O výši těchto ztrát rozhoduje především:

- množství a teplota dmýchaného větru
- rozměry potrubí a jeho žáruvzdorné vyzdívky
- druh použitého žáruvzdorného materiálu
- teplota prostředí vně větrovodu

Jak je zřejmé z výše uvedeného, pokles teploty větru před vstupem do spalovacího prostoru závisí nejen na konstrukčních ukazatelích dmyšné soustavy, nýbrž i na technologické úrovni vysokopecního pochodu a proto se bude u různých výrobních jednotek lišit.

Postup měření a výpočtu ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy vysoké pece byl sestaven pro konkrétní vysokou pec, aplikace je však možná i pro jiné vysoké pece, ovšem při zohlednění možných specifik.

Z výsledů výpočtu pro dvanáct experimentálních měření u konkrétní vysoké pece vyplývá, že vkládání izolační vrstvy do dmyšných elementů vysoké pece je přínosem pro úsporu energie a snižování nákladů na výrobu jedné tuny surového železa.

Celkové tepelné ztráty Q ($\text{kWh} \cdot \text{den}^{-1}$), které byly početně stanoveny mezi izolovanými a neizolovanými armaturami jsou v průměru (z dvanácti měření) $277,6 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$. Poté je možno početně stanovit úsporu/rozdílu, který činí :

$$Q_{\text{rozdl}} = Q_{\text{neizol.}} - Q_{\text{izol.}} = 1044,2 - 766,6 = 277,6 \text{ kWh} \cdot \text{den}^{-1}$$

A při přepočtu na celý rok pak činí:

$$Q = Q_{\text{rozdl}} \cdot 365 \cdot 0,91 = \mathbf{92\,205 \text{ kW} \cdot \text{rok}^{-1}}$$

Pokud by se instalovala uvažovaná izolační vrstva na všech (dvaceti) dmyšných elementech, pak by při ročním provozu bylo snížení ztrát energie:

$$Q \cdot 0,0036 = 331,937 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1} \cdot 20 = 6638,748 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

Jak již bylo uvedeno úspora tepla/energie vede ke snížení tepelných ztrát procesu, což vede ke snižování nákladů na výrobu surového železa, zejména snížení měrné spotřeby paliva (koku). Pro konkrétní vysokou pec je možné při znalosti výhřevnosti koku ($29 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) a známé hodnotě tepelných ztrát chlazením pece (0,5 %) početně stanovit snížení spotřeby paliva:

$$Q / Q_{\text{ir}} = 6638,748 / 29 \cdot 99,5 / 100 = \mathbf{227,8 \text{ tun koku}}$$

V průmyslové praxi nám pak tato úspora energie dovolí snížit spotřebu paliva o cca 228 tun koku ročně.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat současné poznatky v oblasti dmýchání horkého větru do vysokých pecí, dále jeho obohacen kyslíkem a vodíkem s návazností na spotřebu alternativních paliv. Jejichž využití v praxi si klade za cíl celosvětové snížení emisí CO₂, snížení nákladů na výrobu jedné tuny tekutého surového železa a snížení energetické náročnosti výroby surového železa.

V úvodu předložené práce jsou stručně charakterizovány obecné nároky na další rozvoj vysokopečního pochodu a hlavní trendy vývoje, se kterými se současná vysokopeční praxe snaží držet krok.

V teoreticky-analytické části práce se teoretický rozbor zaměřil především na současné literární poznatky z oblasti dmýchání kombinovaného vysokopečního větru. Radikálního snižování potřeby ekologicky škodlivého koksu se dosahuje především injektáží různých náhradních paliv, jako například práškového uhlí, zemního plynu, biopaliv, injektováním redukčního plynu do šachty, či užitím alternativních způsobů výroby železa. Začínají se rozvíjet technologie pro výrobu ve vysokých pecích s injektáží vodíku a v současnosti zejména technologie bezdusíkové pece, efektivně využívající recyklaci plynu.

Experimentální část práce byla zaměřena na výpočet ztráty tepelné energie, tedy teploty horkého větru ve vybraných dmyšných elementech vysoké pece. Sledovanou dmyšnou soupravu tvořily tři základní elementy, tedy kompenzátor, koleno a píšťala. Vkládáním izolační vrstvy do dmyšných armatur vysoké pece se docílí snížení tepelných ztrát dmýchaného větru a tím i snížení poklesu jeho teploty při průtoku plynu těmito armaturami. To ve svých důsledcích vede i ke snižování spotřeby koksu a snižování celkových nákladů na výrobu jedné tuny surového železa.

Experimenty se opíraly jednak o naměřené teploty pro vybrané dmyšné elementy, jednak o originální matematický výpočet tepelných ztrát s využitím bezrozměrných kritérií a základních rovnic pro přestup tepla. V rámci diplomové práce byl vždy uveden ilustrativní výpočet pro konkrétní danou (naměřenou) teplotu a to jak pro dmyšný element neizolovaný a izolovaný.

Dílejšího cíle v experimentální části diplomové práce bylo dosaženo měřením základních hodnot, nutných pro určení (výpočet) ztráty teploty horkého větru dmyšnými elementy za různých provozních podmínek, kde díky tepelné izolaci je možno snížit ztrátu poklesu teploty dmýchaného horkého větru do vysoké pece. Při tomto snížení poklesu ztráty teploty dochází ke snížení spotřeby paliva ve vysoké peci.

Výsledky propočtů tepelných ztrát u běžných i izolační vrstvou vybavených vybraných výfučen jsou uvedeny v tabulkách v experimentální části práce. Dále jsou uvedeny i propočty pro úsporu energie při použití izolace dmyšných elementů u všech výfučen za rok. Souhrnně tento postup představuje možnou metodiku, kterou je žádoucí dále zpřesňovat a přijatá zjednodušení dále rozpracovat.

SEZNAM LITERATURY

- [1] CAVALIERE, P. *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes : Efficient Technologies for Greenhouse Emissions*. Abatement, Springer International Publishing AG, 2019. 167-272 p. ProQuest Ebook Central, http://ebookcentral.proquest.com/lib/vsbtuo-ebooks/https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_4
- [2] HUANG, D., ANDRADE, M. Optimizations of blast furnace oxygen enrichments. In: *AISTech - iron and steel technology conference proceedings*, 2017, vol. 1, pp. 759 – 769.
- [3] GEERDES, M. et al. *Modern Blast Furnace Ironmaking : An introduction*. IOS Press BV, Amsterdam, 2015. 218 p. <https://doi.org/10.3233/978-161499-499-2-i>
- [4] ZHANG, F. Construction and practice on energy flow network of new generation recyclable iron and steel manufacturing process. In: 10th International symposium on high-temperature metallurgical processing. *The minerals, metals & materials series*. 2019, Springer, Cham, pp. 269 – 278. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05955-2_25.
- [5] BABICH, A., SENK, D., GUDENAU, H.W. *IRONMAKING*. Textbook, 2016, RWTH Aachen University, 402 p. ISBN 386-13-099-71.
- [6] XING X. et al. Effect of coal properties on the strength of coke under simulated blast furnace conditions. *Fuel* 2019, 237, pp. 775 – 785. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.069>
- [7] MA, L. et al. Study on cooling down law and temperature control method of liquid blast furnace slag storage device from energy saving of steel industry. *Energy Procedia*, 2019. vol.158, pp. 5596-5601. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.581>
- [8] COELHO Pena JG, de Oliveira VB Jr, Felix Salles JL. Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron and steel-making process under uncertainties. *Comput. Chem Eng*, 2019, 125:351. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.01.025>
- [9] GUPTA, G. S., et al. Process concept for scaling-up and plant studies. In: *Treatise on process metallurgy-volume 3: industrial processes*. Elsevier, Amsterdam, 2014, pp. 1100 – 1144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00040-7>
- [10] CHAI YF. Et al. (2019) Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace. *High Temp Mater Processes*. 38:42 – 49. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0141>
- [11] CONSONNO, F. et al. Case study: restoration of a blast furnace stoves safety automation. 2014 In: *IEEE 23rd international symposium on industrial electronics (ISIE)*. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864768>

- [12] MENEDEZ ARIAS, JL., GONZALEZ-BAQUET, I. Improvement of the performance of blast furnace stoves. *Steel Research*, 2016,72:388. <https://doi.org/10.1002/srin.200100139>
- [13] WANG, X., YU, X., SUN, X. Application of advanced control technology on combustion optimization control system in hot blast stove. In: *Proceedings of the 30th Chinese control and decision conference*, 2018, pp. 5990 – 5992. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8408181>
- [14] ZETTERHOLM, J. et al. Model development of a blast furnace stove. *Energy Procedia* vol. 75, pp1758 – 1765. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.454>
- [15] KOU, M. et al. Numerical Analysis of Effects of Different Blast Parameters on the Gas and Burden Distribution Characteristics Inside Blast Furnace. *ISIJ International*, Vol. 60 (2020), No. 5, pp. 856–864.
- [16] KRÓL, L. *Konstrukcja i urządzenia wielkiego pieca*. Slask – Katowice, 480 s.
- [17] *TERMOKAMERA FLIR* [online]. Praha: Workswell [cit. 2017-05- 06]. Dostupné z: <http://www.termokamery-flir.cz/termokamery>
- [18] PILAŘ, A. a kol. *Chemické inženýrství, díl druhý*. SNTL, 1964. 360 s.
- [19] HOLEČEK, O.,ŠINTA, D. *Sdílení tepla* [online]. 2010 [cit. 2010 – 05 - 13]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf>.
- [20] YUNS A. CENGEL, H. *Heat Transfer: A Practical Approach*, Second Edition, McGraw-Hill, 2003, 921 pp.
- [21] GANPATHY., V. *Steam plant calculations manual* – 2nd edition. revised. and expanded, Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [22] *Přenos tepla prouděním* [online]. 2010 [cit. 2010 – 05 - 13]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k16.sdileni.tepla.pdf>.
- [23] EISLER, J. *Matematika*. ISBN 978-80-253-2172-0, str. 102 – 120.
- [24] HAŠEK P. *Tabulky pro tepelnou techniku*. Skripta VŠB Ostrava, 250 s., 1974.
- [25] RÉDR, M., MIROSLAV PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. SNTL Praha, 680 s. 1991.
- [26] SERTH, R.W. *Process heat transfer principles and applications*. ElsevierScience& Technology Books, 2007.
- [27] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*, 2. vydání, 2005, 129 s. ISBN 80-248-0828-5.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1 Vysoká pec
- Obr.2 Využití uhlíku pomocí redukčních mechanismů
- Obr.3 Proces vylepšeného řízení ohřivačů větru pro vysokou pec
- Obr.4 Řídicí systém vysoké pece
- Obr.5 Schéma systému ohřivačů větru
- Obr.6 Dmýchání horkého větru
- Obr. 7 Využití horkého dmýchaného větru
- Obr. 8 Izolované armatury – píšťala a koleno
- Obr. 9 Souprava dmyšných elementů vysoké pece
- Obr.10 Snímky z termokamery
- Obr.11 Kompenzátor
- Obr.12 Sestava kolena
- Obr.13 Píšťala

SEZNAM TABULEK

Tab.1 Parametry pochodu při obohacení kyslíkem

Tab.2 Typické parametry při změně množství vlhčeného větru

Tab.3 Naměřené hodnoty pro kompenzátor za provozních podmínek

Tab.4 Naměřené teploty pro koleno za provozních podmínek

Tab.5. Naměřené hodnoty pro píst'alu za provozních podmínek

Tab.6 Vybrané vlastnosti vzduchu a kyslíku

Tab.7 Hodnoty dmyšných elementů

Tab. 8 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na píst'ale s izolací a bez izolace

Tab. 9 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na koleně s izolací a bez izolace

Tab.10 Výsledky výpočtů celkové tepelné ztráty na kompenzátoru s izolací a bez izolace

Tab.11 Výsledky výpočtu poklesu teploty větru 1

Tab.12 Výsledky výpočtu poklesu teploty větru 2

Tab.13 Výsledky měření č.1–12 celkově

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Výpočet tepelných ztrát na píst'ale

Výpočet tepelných ztrát na píst'ale bez izolace

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	196,16 mm	_vnější poloměr píst'aly
tw2 =	337 °C	_teplota pláště píst'aly
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,68 m2	_obsah pláště píst'aly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	178,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,22E-05 m2/s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035846 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1029,14 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7821 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	4,00E+08	_Grashofovo kritérium

Výpočet tepelných ztrát na píst'ale s izolací

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	196,16 mm
tw2 =	306,5 °C
ta =	20 °C
S =	1,68 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	163,25 °C
v =	3,04E-05 m2/s
λ =	0,034885 W/(m*K)
cp =	1025,48 J/(kg*K)
ρ =	0,80955 kg/m3
Pr =	0,723
Gr =	4,21E+08

$Pr \cdot Gr = 2,89E+08$
 $Nu = 78,78106$
 $\alpha_k = 7,198069 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 $Q_s = 11873,57 \text{ W}$
 $\alpha_s = 22,29527 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $\alpha_0 = 29,49334 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $Q = 15706,97 \text{ W}$
 $Q = 0,056545 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 377 \text{ kWh/den}$

_součin $Pr \cdot Gr$
 _Nusseltovo kritérium pro
 $0,00001 \leq Gr \cdot Pr \leq 1000000000000$
 _součinitel přestupu tepla konvekcí
 _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
 _Stefanova - Boltzmannova konstanta
 _přestup tepla sáláním
 _součinitel přestupu tepla sáláním
 _celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
 _celková tepelná ztráta

$Pr \cdot Gr = 3,04E+08$
 $Nu = 80,01168$
 $\alpha_k = 7,114568 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 $Q_s = 9547,657 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,8364 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $\alpha_0 = 26,95097 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
 $Q = 12972,04 \text{ W}$
 $Q = 0,046699 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 311 \text{ kWh/den}$

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$ _vnější poloměr píšťaly
 $t_{w2} = 330 \text{ }^\circ\text{C}$ _teplota pláště píšťaly
 $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ _teplota okolního prostředí
 $S = 1,68 \text{ m}^2$ _obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ _střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
 $v = 9,9E-06 \text{ m}^2/\text{s}$ _kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st})
 $\lambda = 0,035625 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ _tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $t_{w2} = 301,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 160,75 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v = 3,01E-05 \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,034727 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

$c_p = 1028,3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
 $\rho = 0,7884 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,225$
 $Gr = 4,18E+09$
 $Pr*Gr = 9,42E+08$

 $Nu = 93,32282$
 $\alpha_k = 8,47427 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$
 $Q_s = 11307,85 \text{ W}$
 $\alpha_s = 21,71245 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $\alpha_0 = 30,18672 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $Q = 15721,24 \text{ W}$
 $Q = 0,056596 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 377 \text{ kWh/den}$

$_m\ddot{e}rn\acute{e} \text{ teplo vzduchu (pro } t_{st})$
 $_hustota \text{ vzduchu (pro } t_{st})$
 $_Prandtlovo \text{ krit\acute{e}rium}$
 $_Grashofovo \text{ krit\acute{e}rium}$
 $_sou\check{c}in \text{ } Pr*Gr$
 $_Nusseltovo \text{ krit\acute{e}rium pro}$
 $0,00001 \leq Gr*Pr \leq 1000000000000$
 $_sou\check{c}initel \text{ p\ddot{r}estupu tepla konvek\check{c}i}$
 $_pom\acute{e}rn\acute{a} \text{ pohltivost pro \u017e\acute{a}rovzdornou a nerezav\acute{e}j\acute{ı}c\acute{ı} ocel}$
 $_Stefanova - Boltzmannova \text{ konstanta}$
 $_p\ddot{r}estup \text{ tepla s\acute{a}l\acute{a}n\acute{ı}m}$
 $_sou\check{c}initel \text{ p\ddot{r}estupu tepla s\acute{a}l\acute{a}n\acute{ı}m}$
 $_celkov\acute{y} \text{ sou\check{c}initel p\ddot{r}estupu tepla na vn\acute{e}j\check{s}\acute{ı} stran\acute{e}$
 $_celkov\acute{a} \text{ tepeln\acute{a} ztr\acute{a}ta}$

$c_p = 1024,88 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
 $\rho = 0,81405 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,723$
 $Gr = 4,24E+08$
 $Pr*Gr = 3,07E+08$

 $Nu = 80,19571$
 $\alpha_k = 7,098737 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$
 $Q_s = 9199,704 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,45298 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $\alpha_0 = 26,55172 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
 $Q = 12556,84 \text{ W}$
 $Q = 0,045205 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 301 \text{ kWh/den}$

M\ddot{e}ren\acute{ı} \u010d.3

V\ddot{y}choz\acute{ı} podm\acute{ı}nky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 343 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$
 $_vn\acute{e}j\check{s}\acute{ı} \text{ polom\acute{e}r p\acute{ı}\check{s}\check{t}'\acute{a}ly}$
 $_teplota \text{ pl\acute{a}\check{s}\check{t}\acute{e} p\acute{ı}\check{s}\check{t}'\acute{a}ly}$
 $_teplota \text{ okoln\acute{ı}ho p\ddot{r}ostred\acute{ı}}$
 $_obsah \text{ pl\acute{a}\check{s}\check{t}\acute{e} p\acute{ı}\check{s}\check{t}'\acute{a}ly}$

Pro zjednodu\check{s}en\acute{ı} v\ddot{y}po\check{c}tu p\ddot{r}edpokl\acute{a}d\acute{a}me tvar ide\acute{a}ln\acute{ı}ho v\acute{a}lce

Vlastn\acute{ı} v\ddot{y}po\check{c}et:

$t_{st} = 181,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $_st\ddot{r}edn\acute{ı} \text{ teplota vzduchu (teplota filmu u vn\acute{e}j\check{s}\acute{ı}ho povrchu)}$

M\ddot{e}ren\acute{ı} \u010d.3

V\ddot{y}choz\acute{ı} podm\acute{ı}nky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$

Pro zjednodu\check{s}en\acute{ı} v\ddot{y}po\check{c}tu p\ddot{r}edpokl\acute{a}d\acute{a}me tvar ide\acute{a}ln\acute{ı}ho v\acute{a}lce

Vlastn\acute{ı} v\ddot{y}po\check{c}et:

$t_{st} = 165 \text{ }^\circ\text{C}$

$v =$	3,26E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
$\lambda =$	0,036032 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
$c_p =$	1029,853 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
$\rho =$	0,776933 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	3,96E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	2,87E+08	_součin $Pr*Gr$
$Nu =$	78,53042	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<= $Gr*Pr$ <=1000000000000
$\alpha_k =$	7,212551 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\varepsilon =$	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	12374,22 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	22,80374 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	30,01629 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	16288,04 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,058637 GJ/hod	
$Q =$	391 kWh/den	

Měření č.4

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	196,16 mm	_vnější poloměr píšťaly
$t_{w2} =$	347 °C	_teplota pláště píšťaly
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	1,68 m ²	_obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

$v =$	3,06E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,034995 W/(m*K)
$c_p =$	1025,9 J/(kg*K)
$\rho =$	0,8064 kg/m ³
$Pr =$	0,724
$Gr =$	4,18E+08
$Pr*Gr =$	3,03E+08
$Nu =$	79,87965
$\alpha_k =$	7,125276 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	9796,642 W
$\alpha_s =$	20,10805 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	27,23332 W/(m ² *K)
$Q =$	13268,08 W
$Q =$	0,047765 GJ/hod
$Q =$	318 kWh/den

Měření č.4

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	196,16 mm
$t_{w2} =$	307 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	1,68 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst = 183,5 °C
v = 3,29E-05 m²/s
λ = 0,036155 W/(m*K)
cp = 1030,323 J/(kg*K)
ρ = 0,773643 kg/m³
Pr = 0,725
Gr = 3,93E+08
Pr*Gr = 2,85E+08

Nu = 78,36745
αk = 7,222152 W/(m²*K)
ε = 0,95
σ = 5,67E-08 W/(m²*K⁴)
Qs = 12716,22 W
αs = 23,14733 W/(m²*K)
α0 = 30,36948 W/(m²*K)
Q = 16683,78 W
Q = 0,060062 GJ/hod
Q = 400 kWh/den

_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
_měrné teplo vzduchu (pro tst)
_hustota vzduchu (pro tst)
_Prandtlovo kritérium
_Grashofovo kritérium
_součin Pr*Gr
_Nusseltovo kritérium pro
0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
_součinitel přestupu tepla konvekcí
_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
_Stefanova - Boltzmannova konstanta
_přestup tepla sáláním
_součinitel přestupu tepla sáláním
_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
_celková tepelná ztráta

Vlastní výpočet:

tst = 163,5 °C
v = 3,04E-05 m²/s
λ = 0,034901 W/(m*K)
cp = 1025,54 J/(kg*K)
ρ = 0,8091 kg/m³
Pr = 0,724
Gr = 4,20E+08
Pr*Gr = 3,04E+08

Nu = 79,99298
αk = 7,116117 W/(m²*K)
ε = 0,95
σ = 5,67E-08 W/(m²*K⁴)
Qs = 9582,951 W
αs = 19,87504 W/(m²*K)
α0 = 26,99116 W/(m²*K)
Q = 13014,06 W
Q = 0,046851 GJ/hod
Q = 312 kWh/den

Měření č.5

Výchozí podmínky:

r2 = 196,16 mm
tw2 = 321 °C
ta = 20 °C
S = 1,68 m²

_vnější poloměr píšťaly
_teplota pláště píšťaly
_teplota okolního prostředí
_obsah pláště píšťaly

Měření č.5

Výchozí podmínky:

r2 = 196,16 mm
tw2 = 298 °C
ta = 20 °C
S = 1,68 m²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	170,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,13E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035342 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1027,22 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7965 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	4,11E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	2,97E+08	_součin Pr*Gr
		_Nusseltovo kritérium pro
		0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
Nu =	79,44843	_součinitel přestupu tepla konvekcí
αk =	7,15698 W/(m ² *K)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
ε =	0,95	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_přestup tepla sáláním
Qs =	10608,87 W	_součinitel přestupu tepla sáláním
αs =	20,97941 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
α0 =	28,13639 W/(m ² *K)	_celková tepelná ztráta
Q =	14228,01 W	
Q =	0,051221 GJ/hod	
Q =	341 kWh/den	

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	159 °C
v =	2,99E-05 m ² /s
λ =	0,034616 W/(m*K)
cp =	1024,455 J/(kg*K)
ρ =	0,817375 kg/m ³
Pr =	0,723
Gr =	4,27E+08
Pr*Gr =	3,08E+08
Nu =	80,32886
αk =	7,087642 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	8961,48 W
αs =	19,18782 W/(m ² *K)
α0 =	26,27546 W/(m ² *K)
Q =	12271,69 W
Q =	0,044178 GJ/hod
Q =	295 kWh/den

Měření č.6

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	196,16 mm	_vnější poloměr píšťaly
$tw_2 =$	317 °C	_teplota pláště píšťaly
$ta =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	1,68 m ²	_obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Měření č.6

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	196,16 mm
$tw_2 =$	291 °C
$ta =$	20 °C
$S =$	1,68 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	168,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,1E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,035216 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1026,74 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,8001 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	4,14E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	2,99E+08	_součin $Pr*Gr$
$Nu =$	79,60799	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<= $Gr*Pr$ <=1000000000000
$\alpha_k =$	7,145787 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\varepsilon =$	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	10308,24 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	20,65945 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	155,5 °C
$\nu =$	2,95E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,03439 W/(m*K)
$c_p =$	1023,598 J/(kg*K)
$\rho =$	0,824288 kg/m ³
$Pr =$	0,723
$Gr =$	4,31E+08
$Pr*Gr =$	3,12E+08
$Nu =$	80,59781
$\alpha_k =$	7,064994 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	8497,999 W
$\alpha_s =$	18,66543 W/(m ² *K)

$\alpha_0 =$	27,80523 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	13873,70 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,049945 GJ/hod	
Q =	333 kWh/den	

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r ₂ =	196,16 mm	_vnější poloměr píšťaly
tw ₂ =	332 °C	_teplota pláště píšťaly
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,68 m ²	_obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	176 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,19E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035688 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1028,54 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7866 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	4,03E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	2,92E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	78,99439	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
α _k =	7,185848 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí

$\alpha_0 =$	25,73043 W/(m ² *K)
Q =	11714,55 W
Q =	0,042172 GJ/hod
Q =	281 kWh/den

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r ₂ =	196,16 mm
tw ₂ =	306,5 °C
ta =	20 °C
S =	1,68 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	163,25 °C
v =	3,04E-05 m ² /s
λ =	0,034885 W/(m*K)
cp =	1025,48 J/(kg*K)
ρ =	0,80955 kg/m ³
Pr =	0,723
Gr =	4,21E+08
Pr*Gr =	3,04E+08
Nu =	80,01168
α _k =	7,114568 W/(m ² *K)

$\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\text{*K}^4\text{)}$
 $Q_s = 11467,48 \text{ W}$
 $\alpha_s = 21,87783 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\alpha_0 = 29,06368 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $Q = 15234,02 \text{ W}$
 $Q = 0,054842 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 366 \text{ kWh/den}$

_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
 _Stefanova - Boltzmannova konstanta
 _přestup tepla sáláním
 _součinitel přestupu tepla sáláním
 _celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
 _celková tepelná ztráta

$\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\text{*K}^4\text{)}$
 $Q_s = 9547,657 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,8364 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\alpha_0 = 26,95097 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $Q = 12972,04 \text{ W}$
 $Q = 0,046699 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 311 \text{ kWh/den}$

Měření č.8

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 341,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$
 _vnější poloměr píšťaly
 _teplota pláště píšťaly
 _teplota okolního prostředí
 _obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Měření č.8

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 305 \text{ }^\circ\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 180,75 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v = 3,25E-05 \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,035986 \text{ W/(m*K)}$
 $cp = 1029,676 \text{ J/(kg*K)}$
 $\rho = 0,778166 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,724$
 _střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
 kinematická viskozita vzduchu (pro t{st})
 tepelná vodivost vzduchu (pro t{st})
 měrné teplo vzduchu (pro t{st})
 hustota vzduchu (pro t{st})
 _Prandtlovo kritérium

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 162,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v = 3,03E-05 \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,034838 \text{ W/(m*K)}$
 $cp = 1025,3 \text{ J/(kg*K)}$
 $\rho = 0,8109 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,723$

Gr = 3,97E+08
 Pr*Gr = 2,87E+08
 Nu = 78,59093
 $\alpha_k = 7,208867 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67\text{E-}08 \text{ W/(m}^2\text{*K}^4\text{)}$
 $Q_s = 12247,68 \text{ W}$
 $\alpha_s = 22,67585 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\alpha_0 = 29,88471 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $Q = 16141,33 \text{ W}$
 $Q = 0,058109 \text{ GJ/hod}$
Q = 387 kWh/den

_Grashofovo kritérium
 _součin Pr*Gr
 _Nusseltovo kritérium pro
 $0,00001 \leq Gr*Pr \leq 1000000000000$
 _součinitel přestupu tepla konvekcí
 _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
 _Stefanova - Boltzmannova konstanta
 _přestup tepla sáláním
 _součinitel přestupu tepla sáláním
 _celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
 _celková tepelná ztráta

Gr = 4,22E+08
 Pr*Gr = 3,05E+08
 Nu = 80,06747
 $\alpha_k = 7,109886 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67\text{E-}08 \text{ W/(m}^2\text{*K}^4\text{)}$
 $Q_s = 9442,32 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,7208 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $\alpha_0 = 26,83069 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
 $Q = 12846,53 \text{ W}$
 $Q = 0,046248 \text{ GJ/hod}$
Q = 308 kWh/den

Měření č.9

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 336 \text{ }^\circ\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$
 _vnější poloměr píšťaly
 _teplota pláště píšťaly
 _teplota okolního prostředí
 _obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$tst = 178 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v = 3,22\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$

_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
 _kinematická viskozita vzduchu (pro tst)

Měření č.9

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 305,5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$tst = 162,75 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v = 3,03\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$

$\lambda = 0,035814 \text{ W/(m}^*\text{K)}$
 $c_p = 1029,02 \text{ J/(kg}^*\text{K)}$
 $\rho = 0,783 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,724$
 $Gr = 4,00E+08$
 $Pr*Gr = 2,90E+08$

 $Nu = 78,82405$
 $\alpha_k = 7,195669 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
 $Q_s = 11791,55 \text{ W}$
 $\alpha_s = 22,21132 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $\alpha_0 = 29,40699 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $Q = 15611,58 \text{ W}$
 $Q = 0,056202 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 375 \text{ kWh/den}$

_teplná vodivost vzduchu (pro tst)
 _měrné teplo vzduchu (pro tst)
 _hustota vzduchu (pro tst)
 _Prandtlovo kritérium
 _Grashofovo kritérium
 _součin $Pr*Gr$
 _Nusseltovo kritérium pro
 $0,00001 \leq Gr*Pr \leq 1000000000000$
 _součinitel přestupu tepla konvekcí
 _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
 _Stefanova - Boltzmannova konstanta
 _přestup tepla sáláním
 _součinitel přestupu tepla sáláním
 _celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
 _celková tepelná ztráta

$\lambda = 0,034853 \text{ W/(m}^*\text{K)}$
 $c_p = 1025,36 \text{ J/(kg}^*\text{K)}$
 $\rho = 0,81045 \text{ kg/m}^3$
 $Pr = 0,723$
 $Gr = 4,21E+08$
 $Pr*Gr = 3,05E+08$

 $Nu = 80,04893$
 $\alpha_k = 7,111453 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67E-08 \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
 $Q_s = 9477,341 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,75928 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $\alpha_0 = 26,87073 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 $Q = 12888,28 \text{ W}$
 $Q = 0,046398 \text{ GJ/hod}$
 $Q = 309 \text{ kWh/den}$

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$ _vnější poloměr píšťaly
 $tw_2 = 336,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ _teplota pláště píšťaly
 $ta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ _teplota okolního prostředí
 $S = 1,68 \text{ m}^2$ _obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 301 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 178,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $v = 3,22\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,03583 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$
 $c_p = 1029,08 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$
 $\rho = 0,78255 \text{ kg}/\text{m}^3$
 $Pr = 0,724$
 $Gr = 4,00\text{E}+08$
 $Pr*Gr = 2,90\text{E}+08$

 $Nu = 78,80258$
 $\alpha_k = 7,196871 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67\text{E-}08 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K}^4)$
 $Q_s = 11832,51 \text{ W}$
 $\alpha_s = 22,25327 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $\alpha_0 = 29,45014 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $Q = 15659,23 \text{ W}$
 $Q = 0,056373 \text{ GJ}/\text{hod}$
 $Q = 376 \text{ kWh}/\text{den}$

Měření č.11**Výchozí podmínky:**

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 332,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$_střední \text{ teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)}$
 $_kinematická \text{ viskozita vzduchu (pro } t_{st})$
 $_tepelná \text{ vodivost vzduchu (pro } t_{st})$
 $_měrné \text{ teplo vzduchu (pro } t_{st})$
 $_hustota \text{ vzduchu (pro } t_{st})$
 $_Prandtlovo \text{ kritérium}$
 $_Grashofovo \text{ kritérium}$
 $_součin \text{ } Pr*Gr$
 $_Nusseltovo \text{ kritérium pro}$
 $0,00001 \leq Gr*Pr \leq 1000000000000$
 $_součinitel \text{ přestupu tepla konvekcí}$
 $_poměrná \text{ pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel}$
 $_Stefanova - Boltzmannova \text{ konstanta}$
 $_přestup \text{ tepla sáláním}$
 $_součinitel \text{ přestupu tepla sáláním}$
 $_celkový \text{ součinitel přestupu tepla na vnější straně}$
 $_celková \text{ tepelná ztráta}$

$_vnější \text{ poloměr píst'aly}$
 $_teplota \text{ pláště píst'aly}$
 $_teplota \text{ okolního prostředí}$

Vlastní výpočet:

$t_{st} = 160,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $v = 3,01\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,034712 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$
 $c_p = 1024,82 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$
 $\rho = 0,8145 \text{ kg}/\text{m}^3$
 $Pr = 0,723$
 $Gr = 4,25\text{E}+08$
 $Pr*Gr = 3,07\text{E}+08$

 $Nu = 80,2138$
 $\alpha_k = 7,097118 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $\varepsilon = 0,95$
 $\sigma = 5,67\text{E-}08 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K}^4)$
 $Q_s = 9165,404 \text{ W}$
 $\alpha_s = 19,41494 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $\alpha_0 = 26,51206 \text{ W}/(\text{m}^2^{\circ}\text{K})$
 $Q = 12515,81 \text{ W}$
 $Q = 0,045057 \text{ GJ}/\text{hod}$
 $Q = 300 \text{ kWh}/\text{den}$

Měření č.11**Výchozí podmínky:**

$r_2 = 196,16 \text{ mm}$
 $tw_2 = 312 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $ta = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Vlastní výpočet:

tst =	176,25 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,2E-05 m2/s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035704 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1028,6 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,78615 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	4,03E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	2,92E+08	_součin Pr*Gr
		_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
Nu =	78,97324	
αk =	7,187095 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekci
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	11507,64 W	_přestup tepla sáláním
αs =	21,91932 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	29,10641 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	15280,87 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,055011 GJ/hod	
Q =	367 kWh/den	

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	196,16 mm	_vnější poloměr píšťaly
tw2 =	340 °C	teplota pláště píšťaly

S = 1,68 m²
Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	166 °C
v =	3,07E-05 m2/s
λ =	0,035058 W/(m*K)
cp =	1026,14 J/(kg*K)
ρ =	0,8046 kg/m3
Pr =	0,724
Gr =	4,17E+08
Pr*Gr =	3,02E+08
Nu =	79,80304
αk =	7,131258 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	9940,946 W
αs =	20,26449 W/(m2*K)
α0 =	27,39574 W/(m2*K)
Q =	13439,26 W
Q =	0,048381 GJ/hod
Q =	323 kWh/den

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	196,16 mm
tw2 =	313 °C

ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,68 m ²	_obsah pláště píšťaly

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

$t_a = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $S = 1,68 \text{ m}^2$
 Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	180 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,24E-05 m2/s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,03594 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1029,5 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7794 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	3,98E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	2,88E+08	_součin Pr*Gr
		_Nusseltovo kritérium pro
Nu =	78,65109	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	7,205139 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekci
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	12122,06 W	_přestup tepla sáláním
αs =	22,54847 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	29,75361 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	15995,54 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,057584 GJ/hod	
Q =	384 kWh/den	

Vlastní výpočet:

tst =	166,5 °C
v =	3,08E-05 m/s
λ =	0,03509 W/(m*K)
cp =	1026,26 J/(kg*K)
ρ =	0,8037 kg/m3
Pr =	0,724
Gr =	4,16E+08
Pr*Gr =	3,01E+08
Nu =	79,76444
αk =	7,134212 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	10013,66 W
αs =	20,34304 W/(m2*K)
α0 =	27,47725 W/(m2*K)
Q =	13525,40 W
Q =	0,048691 GJ/hod
Q =	325 kWh/den

Příloha č. 2: Výpočet tepelných ztrát na kolenu

Výpočet tepelných ztrát na kolenu bez izolace

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	290 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	155 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	2,94201E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,0343575 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1023,475 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,825275 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,20E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,66E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	102,1563406	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000

Výpočet tepelných ztrát na kolenu s izolací

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	257 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	138,5 °C
v =	2,75E-05 m ² /s
λ =	0,03329175 W/(m*K)
cp =	1019,4325 J/(kg*K)
ρ =	0,858155 kg/m ³
Pr =	0,722
Gr =	9,63E+08
Pr*Gr =	6,95E+08
Nu =	103,5416652

$\alpha_k =$	6,950171231 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekci
$\varepsilon =$	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	5556,862989 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	18,59166579 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	25,54183703 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	7634,20 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,027483119 GJ/hod	
$Q =$	183 kWh/den	

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
$t_{w2} =$	302 °C	_teplota pláště šikmého kusu
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	161 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,01294E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,034743 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1024,94 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,8136 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})

$\alpha_k =$	6,825907391 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	4269,942357 W
$\alpha_s =$	16,27518917 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	23,10109657 W/(m ² *K)
$Q =$	6060,78 W
$Q =$	0,02181881 GJ/hod
$Q =$	145 kWh/den

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$t_{w2} =$	247 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	133,5 °C
$\nu =$	2,69E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,03296425 W/(m*K)
$c_p =$	1018,2075 J/(kg*K)
$\rho =$	0,869005 kg/m ³

Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,04E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,54E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,5718957	_Nusseltovo kritérium pro
$\alpha_k =$	6,987945291 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
$\varepsilon =$	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	6084,607841 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$\alpha_s =$	19,49107818 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
$\alpha_0 =$	26,47902347 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	8266,06 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,029757826 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	198 kWh/den	

Měření č.3

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	319 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

Pr =	0,722
Gr =	9,74E+08
Pr*Gr =	7,03E+08
Nu =	103,9143323
$\alpha_k =$	6,783085205 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	3924,477596 W
$\alpha_s =$	15,61738714 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	22,40047234 W/(m ² *K)
Q =	5628,99 W
Q =	0,020264372 GJ/hod
Q =	135 kWh/den

Měření č.3

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	258 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	169,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,11589E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,0352785 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1026,98 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7983 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,79E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,36E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	100,7431965	_Nusseltovo kritérium pro
αk =	7,037760112 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
ε =	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	6890,937751 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
αs =	20,81898333 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
α0 =	27,85674345 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	9220,39 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,033193394 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	221 kWh/den	

Měření č.4

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	293 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

tst =	139 °C
v =	2,75E-05 m ² /s
λ =	0,0333245 W/(m*K)
cp =	1019,555 J/(kg*K)
ρ =	0,85707 kg/m ³
Pr =	0,722
Gr =	9,62E+08
Pr*Gr =	6,95E+08
Nu =	103,5017305
αk =	6,829986966 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	4305,582477 W
αs =	16,34208011 W/(m ² *K)
α0 =	23,17206707 W/(m ² *K)
Q =	6105,05 W
Q =	0,021978187 GJ/hod
Q =	147 kWh/den

Měření č.4

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	266 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	156,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	2,95966E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,03445425 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1023,8425 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8223125 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,16E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,63E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	102,0120278	_Nusseltovo kritérium pro
αk =	6,95989685 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
ε =	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	5685,681001 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
αs =	18,81361367 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
α0 =	25,77351052 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	7789,04 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,028040538 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	187 kWh/den	

Měření č.5**Výchozí podmínky:**

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
------	----------	------------------------------

Vlastní výpočet:

tst =	143 °C
v =	2,80E-05 m ² /s
λ =	0,0335835 W/(m*K)
cp =	1020,535 J/(kg*K)
ρ =	0,848975 kg/m ³
Pr =	0,723
Gr =	9,52E+08
Pr*Gr =	6,88E+08
Nu =	103,1960522
αk =	6,86274182 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	4598,034827 W
αs =	16,88455148 W/(m ² *K)
α0 =	23,7472933 W/(m ² *K)
Q =	6466,91 W
Q =	0,023280877 GJ/hod
Q =	155 kWh/den

Měření č.5**Výchozí podmínky:**

r2 =	252,5 mm
------	----------

tw2 =	286 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m2	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

tw2 =	262 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	153 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	2,91849E-05 m2/s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,0342285 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1022,985 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,829225 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,26E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,70E+08	_součin Pr*Gr
		_Nusseltovo kritérium pro
Nu =	102,3441133	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	6,936802935 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	5388,27886 W	_přestup tepla sáláním
αs =	18,29872398 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	25,23552691 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	7430,90 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,026751253 GJ/hod	
Q =	178 kWh/den	

Měření č.6

Vlastní výpočet:

tst =	141 °C
v =	2,78E-05 m2/s
λ =	0,0334545 W/(m*K)
cp =	1020,045 J/(kg*K)
ρ =	0,852925 kg/m3
Pr =	0,722
Gr =	9,57E+08
Pr*Gr =	6,91E+08
Nu =	103,3473915
αk =	6,846406549 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	4450,169269 W
αs =	16,6116795 W/(m2*K)
α0 =	23,45808605 W/(m2*K)
Q =	6284,28 W
Q =	0,02262341 GJ/hod
Q =	151 kWh/den

Měření č.6

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	310 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m2	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	269 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	165 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,06139E-05 m2/s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,034995 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1025,9 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8064 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,92E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,46E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,1914737	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	7,012268559 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	6455,286994 W	_přestup tepla sáláním
αs =	20,10804907 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	27,12031763 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně

Vlastní výpočet:

tst =	144,5 °C
v =	2,82E-05 m2/s
λ =	0,03368025 W/(m*K)
cp =	1020,9025 J/(kg*K)
ρ =	0,8460125 kg/m3
Pr =	0,723
Gr =	9,48E+08
Pr*Gr =	6,85E+08
Nu =	103,0781457
αk =	6,874648943 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	4711,115269 W
αs =	17,09136553 W/(m2*K)
α0 =	23,96601447 W/(m2*K)

Q = 8706,44 W _celková tepelná ztráta
 Q = 0,031343168 GJ/hod
 Q = 209 kWh/den

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r2 = 252,5 mm _vnější poloměr šikmého kusu
 tw2 = 334 °C _teplota pláště šikmého kusu
 ta = 20 °C _teplota okolního prostředí
 S = 1,107 m2 _obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Q = 6606,06 W
 Q = 0,023781831 GJ/hod
 Q = 159 kWh/den

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r2 = 252,5 mm
 tw2 = 291 °C
 ta = 20 °C
 S = 1,107 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst = 177 °C _střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
 v = 3,20672E-05 m2/s _kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
 λ = 0,035751 W/(m*K) _tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
 cp = 1028,78 J/(kg*K) _měrné teplo vzduchu (pro tst)
 ρ = 0,7848 kg/m3 _hustota vzduchu (pro tst)
 Pr = 0,724 _Prandtlovo kritérium
 Gr = 8,57E+08 _Grashofovo kritérium
 Pr*Gr = 6,21E+08 _součin Pr*Gr
 _Nusseltovo kritérium pro
 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
 Nu = 99,95273366 _součinitel přestupu tepla konvekcí
 αk = 7,076059764 W/(m2*K)
 ε = 0,95 _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel

Vlastní výpočet:

tst = 155,5 °C
 v = 2,95E-05 m2/s
 λ = 0,03438975 W/(m*K)
 cp = 1023,5975 J/(kg*K)
 ρ = 0,8242875 kg/m3
 Pr = 0,723
 Gr = 9,19E+08
 Pr*Gr = 6,65E+08
 Nu = 102,1085628
 αk = 6,953441483 W/(m2*K)
 ε = 0,95

$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	7662,492914 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	22,04412256 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	29,12018233 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	10122,12 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,036439622 GJ/hod	
$Q =$	243 kWh/den	

Měření č.8

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
$t_{w2} =$	333 °C	_teplota pláště šikmého kusu
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	176,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,20067E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,0357195 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1028,66 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,7857 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	8,58E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	6,22E+08	_součin $Pr*Gr$

$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	5599,574325 W
$\alpha_s =$	18,6654344 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	25,61887589 W/(m ² *K)
$Q =$	7685,59 W
$Q =$	0,027668109 GJ/hod
$Q =$	184 kWh/den

Měření č.8

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$t_{w2} =$	281 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	150,5 °C
$\nu =$	2,89E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,03406725 W/(m*K)
$c_p =$	1022,3725 J/(kg*K)
$\rho =$	0,8341625 kg/m ³
$Pr =$	0,723
$Gr =$	9,33E+08
$Pr*Gr =$	6,74E+08

Nu =	100,0070025	_Nusseltovo kritérium pro
$\alpha_k =$	7,073663616 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
$\varepsilon =$	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	7609,241741 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$\alpha_s =$	21,96086404 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
$\alpha_0 =$	29,03452765 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	10060,20 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,036216729 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	241 kWh/den	

Měření č.9

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	328 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	174 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,17039E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
$\lambda =$	0,035562 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1028,06 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)

Nu =	102,5710742
$\alpha_k =$	6,91943451 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	5182,576308 W
$\alpha_s =$	17,93732087 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	24,85675538 W/(m ² *K)
Q =	7181,79 W
Q =	0,025854436 GJ/hod
Q =	172 kWh/den

Měření č.9

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	271 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	145,5 °C
$\nu =$	2,83E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,03374475 W/(m*K)
cp =	1021,1475 J/(kg*K)

$\rho =$	0,7902 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	8,66E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	6,27E+08	_součin $Pr*Gr$
$Nu =$	100,2750705	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<= $Gr*Pr$ <=1000000000000
$\alpha_k =$	7,061350608 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekci
$\varepsilon =$	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	7346,912113 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	21,5479772 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	28,6093278 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	9754,52 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,035116279 GJ/hod	
$Q =$	234 kWh/den	

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
$t_{w2} =$	310 °C	_teplota pláště šikmého kusu
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$\rho =$	0,8440375 kg/m ³
$Pr =$	0,723
$Gr =$	9,46E+08
$Pr*Gr =$	6,84E+08
$Nu =$	102,9975071
$\alpha_k =$	6,882425998 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	4787,552526 W
$\alpha_s =$	17,23027502 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	24,11270102 W/(m ² *K)
$Q =$	6699,88 W
$Q =$	0,024119578 GJ/hod
$Q =$	161 kWh/den

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$t_{w2} =$	271 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	165 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,06139E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,034995 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1025,9 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8064 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,92E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,46E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,1914737	_Nusseltovo kritérium pro
αk =	7,012268559 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
ε =	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	6455,286994 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
αs =	20,10804907 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
α0 =	27,12031763 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	8706,44 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,031343168 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	209 kWh/den	

Měření č.11

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
tw2 =	301 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m ²	_obsah pláště šikmého kusu

tst =	145,5 °C
v =	2,83E-05 m ² /s
λ =	0,03374475 W/(m*K)
cp =	1021,1475 J/(kg*K)
ρ =	0,8440375 kg/m ³
Pr =	0,723
Gr =	9,46E+08
Pr*Gr =	6,84E+08
Nu =	102,9975071
αk =	6,882425998 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	4787,552526 W
αs =	17,23027502 W/(m ² *K)
α0 =	24,11270102 W/(m ² *K)
Q =	6699,88 W
Q =	0,024119578 GJ/hod
Q =	161 kWh/den

Měření č.11

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	274 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	160,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,00689E-05 m ² /s	_kinematická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,0347115 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1024,82 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8145 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,05E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,55E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,6181859	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	6,984791405 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	6039,346769 W	_přestup tepla sáláním
αs =	19,4149388 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	26,39973021 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	8212,08 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,029563506 GJ/hod	
Q =	197 kWh/den	

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr šikmého kusu
------	----------	------------------------------

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	147 °C
v =	2,85E-05 m ² /s
λ =	0,0338415 W/(m*K)
cp =	1021,515 J/(kg*K)
ρ =	0,841075 kg/m ³
Pr =	0,723
Gr =	9,42E+08
Pr*Gr =	6,81E+08
Nu =	102,8735777
αk =	6,893853818 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	4903,799403 W
αs =	17,4401959 W/(m ² *K)
α0 =	24,33404972 W/(m ² *K)
Q =	6842,20 W
Q =	0,024631918 GJ/hod
Q =	164 kWh/den

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
------	----------

tw2 =	315 °C	_teplota pláště šikmého kusu
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	1,107 m2	_obsah pláště šikmého kusu

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

tw2 =	263 °C
ta =	20 °C
S =	1,107 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	167,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,09167E-05 m2/s	_kinemtická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,0351525 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1026,5 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8019 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,85E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,41E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	100,9449793	_Nusseltovo kritérium pro
αk =	7,026670072 W/(m2*K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
ε =	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	6694,842765 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
αs =	20,50079698 W/(m2*K)	_přestup tepla sáláním
α0 =	27,52746705 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	8989,51 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,032362226 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	216 kWh/den	

Vlastní výpočet:

tst =	141,5 °C
v =	2,78E-05 m2/s
λ =	0,03348675 W/(m*K)
cp =	1020,1675 J/(kg*K)
ρ =	0,8519375 kg/m3
Pr =	0,722
Gr =	9,56E+08
Pr*Gr =	6,90E+08
Nu =	103,3101982
αk =	6,850540159 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	4486,826358 W
αs =	16,67958988 W/(m2*K)
α0 =	23,53013004 W/(m2*K)
Q =	6329,63 W
Q =	0,022786663 GJ/hod
Q =	152 kWh/den

Příloha č. 3: Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru

Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru bez izolace

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	314 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m2	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	167 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,08561E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035121 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1026,38 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8028 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,86E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,42E+08	_součin
Nu =	100,9947958	Pr*Gr
αk =	7,023838064 W/(m2*K)	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
		_součinitel přestupu tepla konvekcí

Výpočet tepelných ztrát na kompenzátoru s izolací

Měření č.1

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	251 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	135,5 °C
v =	2,71E-05 m2/s
λ =	0,033095 W/(m*K)
cp =	1018,698 J/(kg*K)
ρ =	0,864665 kg/m3
Pr =	0,722
Gr =	9,69E+08
Pr*Gr =	7,00E+08
Nu =	103,7712
αk =	6,800663 W/(m2*K)

$\varepsilon =$	0,95		_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08	W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	13899,28494	W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	20,42180536	W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	27,44564342	W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	18679,78	W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,067247206	GJ/hod	
Q =	448	kWh/den	

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5	mm	_vnější poloměr kompenzátoru
$t_{w2} =$	320	°C	_teplota pláště kompenzátoru
$t_a =$	20	°C	_teplota okolního prostředí
$S =$	2,315	m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	170	°C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,12194E-05	m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,03531	W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1027,1	J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,7974	kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724		_Prandtlovo kritérium

$\varepsilon =$	0,95		
$\sigma =$	5,67E-08	W/(m ² *K ⁴)	
$Q_s =$	8491,049	W	
$\alpha_s =$	15,87809	W/(m ² *K)	
$\alpha_0 =$	22,67876	W/(m ² *K)	
$Q =$	12127,81	W	
$Q =$	0,04366	GJ/hod	
Q =	291	kWh/den	

Měření č.2

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5	mm	
$t_{w2} =$	242	°C	
$t_a =$	20	°C	
$S =$	2,315	m ²	

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	131	°C	
$\nu =$	2,66E-05	m ² /s	
$\lambda =$	0,032801	W/(m*K)	
$c_p =$	1017,595	J/(kg*K)	
$\rho =$	0,87443	kg/m ³	
$Pr =$	0,722		

Gr =	8,78E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,35E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	100,6921329	_Nusseltovo kritérium pro
$\alpha_k =$	7,040473687 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
$\varepsilon =$	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	14514,41558 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$\alpha_s =$	20,89908651 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
$\alpha_0 =$	27,9395602 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	19404,02 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,069854488 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	466 kWh/den	

Měření č.3

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	310 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Gr =	9,79E+08
Pr*Gr =	7,07E+08
Nu =	104,0815
$\alpha_k =$	6,760245 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	7861,071 W
$\alpha_s =$	15,29599 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	22,05624 W/(m ² *K)
Q =	11335,36 W
Q =	0,040807 GJ/hod
Q =	272 kWh/den

Měření č.3

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	238 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	165 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,06139E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,034995 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1025,9 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8064 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,92E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,46E+08	_součin
Nu =	101,1914737	Pr*Gr
αk =	7,012268559 W/(m2*K)	_Nusseltovo kritérium pro
ε =	0,95	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
Qs =	13499,53874 W	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
αs =	20,10804907 W/(m2*K)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
α0 =	27,12031763 W/(m2*K)	_přestup tepla sáláním
Q =	18207,23 W	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	0,065546011 GJ/hod	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	437 kWh/den	_celková tepelná ztráta

Měření č.4**Výchozí podmínky:**

r2 = 252,5 mm

_vnější poloměr kompenzátoru

Vlastní výpočet:

tst =	129 °C
v =	2,64E-05 m2/s
λ =	0,03267 W/(m*K)
cp =	1017,105 J/(kg*K)
ρ =	0,87877 kg/m3
Pr =	0,722
Gr =	9,83E+08
Pr*Gr =	7,10E+08
Nu =	104,2053
αk =	6,741258 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	7591,472 W
αs =	15,04245 W/(m2*K)
α0 =	21,78371 W/(m2*K)
Q =	10993,58 W
Q =	0,039577 GJ/hod
Q =	264 kWh/den

Měření č.4**Výchozí podmínky:**

r2 = 252,5 mm

tw2 =	299 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m2	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

tw2 =	262 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	159,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	2,99495E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,03464775 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1024,5775 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,8163875 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,723	_Prandtlovo kritérium
Gr =	9,08E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,57E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,7148041	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	6,978592288 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	12441,88372 W	_přestup tepla sáláním
αs =	19,26331114 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
α0 =	26,24190343 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	16949,25 W	_celková tepelná ztráta
Q =	0,061017306 GJ/hod	

Vlastní výpočet:

tst =	141 °C
v =	2,78E-05 m2/s
λ =	0,033455 W/(m*K)
cp =	1020,045 J/(kg*K)
ρ =	0,852925 kg/m3
Pr =	0,722
Gr =	9,57E+08
Pr*Gr =	6,91E+08
Nu =	103,3474
αk =	6,846407 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	9306,361 W
αs =	16,61168 W/(m2*K)
α0 =	23,45809 W/(m2*K)
Q =	13141,92 W
Q =	0,047311 GJ/hod

$$Q = 407 \text{ kWh/den}$$

Měření č.5

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
$tw_2 =$	295 °C	_teplota pláště kompenzátoru
$ta =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	157,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	2,97142E-05 m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,03451875 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$cp =$	1024,0875 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,8203375 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,723	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	9,14E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	6,61E+08	_součin
$Nu =$	101,9142071	_Nusseltovo kritérium pro $0,00001 \leq Gr*Pr \leq 1000000000000$
$\alpha_k =$	6,966239678 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\varepsilon =$	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta

$$Q = 315 \text{ kWh/den}$$

Měření č.5

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$tw_2 =$	245 °C
$ta =$	20 °C
$S =$	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	132,5 °C
$\nu =$	2,68E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,032899 W/(m*K)
$cp =$	1017,963 J/(kg*K)
$\rho =$	0,871175 kg/m ³
$Pr =$	0,722
$Gr =$	9,76E+08
$Pr*Gr =$	7,05E+08
$Nu =$	103,9828
$\alpha_k =$	6,774066 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)

$Q_s =$	12072,0978 W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	18,96265116 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	25,92889084 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	16506,98 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,059425128 GJ/hod	
$Q =$	396 kWh/den	

Měření č.6

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
$t_{w2} =$	331 °C	_teplota pláště kompenzátoru
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	175,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,18856E-05 m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,0356565 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1028,42 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,7875 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium

$Q_s =$	8067,434 W
$\alpha_s =$	15,48823 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	22,2623 W/(m ² *K)
$Q =$	11595,88 W
$Q =$	0,041745 GJ/hod
$Q =$	278 kWh/den

Měření č.6

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$t_{w2} =$	264 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	142 °C
$\nu =$	2,79E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,033519 W/(m*K)
$c_p =$	1020,29 J/(kg*K)
$\rho =$	0,85095 kg/m ³
$Pr =$	0,722

Gr =	8,61E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,24E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	100,1148908	_Nusseltovo kritérium pro
$\alpha_k =$	7,068805157 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
$\varepsilon =$	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	15691,65814 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$\alpha_s =$	21,79502912 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
$\alpha_0 =$	28,86383427 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	20780,95 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,074811422 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	499 kWh/den	

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	336 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Gr =	9,55E+08
Pr*Gr =	6,90E+08
Nu =	103,2726
$\alpha_k =$	6,85464 W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	9460,109 W
$\alpha_s =$	16,74771 W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	23,60235 W/(m ² *K)
Q =	13332,02 W
Q =	0,047995 GJ/hod
Q =	320 kWh/den

Měření č.7

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	265 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	178 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,21883E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035814 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1029,02 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,783 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,54E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,19E+08	_součin
Nu =	99,84355615	Pr*Gr
αk =	7,080786376 W/(m2*K)	_Nusseltovo kritérium pro
ε =	0,95	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
Qs =	16248,47148 W	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
αs =	22,21132335 W/(m2*K)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
α0 =	29,29210973 W/(m2*K)	_přestup tepla sáláním
Q =	21428,35 W	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	0,07714206 GJ/hod	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	514 kWh/den	_celková tepelná ztráta

Měření č.8**Výchozí podmínky:**

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	328 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí

Vlastní výpočet:

tst =	142,5 °C	
v =	2,79E-05 m2/s	
λ =	0,033551 W/(m*K)	
cp =	1020,413 J/(kg*K)	
ρ =	0,849963 kg/m3	
Pr =	0,723	
Gr =	9,53E+08	
Pr*Gr =	6,89E+08	
Nu =	103,2345	
αk =	6,858708 W/(m2*K)	
ε =	0,95	
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	
Qs =	9537,629 W	
αs =	16,81603 W/(m2*K)	
α0 =	23,67473 W/(m2*K)	
Q =	13427,72 W	
Q =	0,04834 GJ/hod	
Q =	322 kWh/den	

Měření č.8**Výchozí podmínky:**

r2 =	252,5 mm
tw2 =	262 °C
ta =	20 °C

S = 2,315 m² _obsah pláště kompenzátoru
 Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního
 válce

Vlastní výpočet:

tst =	174 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,17039E-05 m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035562 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1028,06 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7902 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,66E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,27E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	100,2750705	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	7,061350608 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
ε =	0,95	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_přestup tepla sáláním
Qs =	15364,1387 W	_součinitel přestupu tepla sáláním
αs =	21,5479772 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
α0 =	28,6093278 W/(m ² *K)	_celková tepelná ztráta
Q =	20399,02 W	
Q =	0,073436482 GJ/hod	
Q =	490 kWh/den	

S = 2,315 m²
 Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar
 ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	141 °C
v =	2,78E-05 m ² /s
λ =	0,033455 W/(m*K)
cp =	1020,045 J/(kg*K)
ρ =	0,852925 kg/m ³
Pr =	0,722
Gr =	9,57E+08
Pr*Gr =	6,91E+08
Nu =	103,3474
αk =	6,846407 W/(m ² *K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)
Qs =	9306,361 W
αs =	16,61168 W/(m ² *K)
α0 =	23,45809 W/(m ² *K)
Q =	13141,92 W
Q =	0,047311 GJ/hod
Q =	315 kWh/den

Měření č.9

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	330 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m2	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	175 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
v =	3,18E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)
λ =	0,035625 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)
cp =	1028,3 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)
ρ =	0,7884 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)
Pr =	0,724	_Prandtlovo kritérium
Gr =	8,63E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,25E+08	_součin
Nu =	100,1685064	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
αk =	7,066342653 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
ε =	0,95	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
Qs =	15581,94123 W	_přestup tepla sáláním
αs =	21,71245207 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla sáláním

Měření č.9

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	265 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m2

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	142,5 °C
v =	2,79E-05 m2/s
λ =	0,033551 W/(m*K)
cp =	1020,413 J/(kg*K)
ρ =	0,849963 kg/m3
Pr =	0,723
Gr =	9,53E+08
Pr*Gr =	6,89E+08
Nu =	103,2345
αk =	6,858708 W/(m2*K)
ε =	0,95
σ =	5,67E-08 W/(m2*K4)
Qs =	9537,629 W
αs =	16,81603 W/(m2*K)

$\alpha_0 =$	28,77879472 W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	20653,10 W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,074351167 GJ/hod	
$Q =$	496 kWh/den	

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
$t_{w2} =$	317 °C	_teplota pláště kompenzátoru
$t_a =$	20 °C	_teplota okolního prostředí
$S =$	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	168,5 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,10E-05 m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,0352155 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1026,74 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,8001 kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium
$Gr =$	8,82E+08	_Grashofovo kritérium
$Pr*Gr =$	6,39E+08	_součin
$Nu =$	100,8445867	$Pr*Gr$
		_Nusseltovo kritérium pro
		0,00001<= $Gr*Pr$ <=1000000000000

$\alpha_0 =$	23,67473 W/(m ² *K)
$Q =$	13427,72 W
$Q =$	0,04834 GJ/hod
$Q =$	322 kWh/den

Měření č.10

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5 mm
$t_{w2} =$	264 °C
$t_a =$	20 °C
$S =$	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	142 °C
$\nu =$	2,79E-05 m ² /s
$\lambda =$	0,033519 W/(m*K)
$c_p =$	1020,29 J/(kg*K)
$\rho =$	0,85095 kg/m ³
$Pr =$	0,722
$Gr =$	9,55E+08
$Pr*Gr =$	6,90E+08
$Nu =$	103,2726

$\alpha_k =$	7,032262463	W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\varepsilon =$	0,95		_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
$\sigma =$	5,67E-08	W/(m ² *K ⁴)	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$Q_s =$	14204,50507	W	_přestup tepla sáláním
$\alpha_s =$	20,65944553	W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
$\alpha_0 =$	27,691708	W/(m ² *K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
$Q =$	19039,57	W	_celková tepelná ztráta
$Q =$	0,06854246	GJ/hod	
$Q =$	457	kWh/den	

Měření č.11

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5	mm	_vnější poloměr kompenzátoru
$t_{w2} =$	309	°C	_teplota pláště kompenzátoru
$t_a =$	20	°C	_teplota okolního prostředí
$S =$	2,315	m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	164,5	°C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
$\nu =$	3,06E-05	m ² /s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro t_{st})
$\lambda =$	0,0349635	W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro t_{st})
$c_p =$	1025,78	J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro t_{st})
$\rho =$	0,8073	kg/m ³	_hustota vzduchu (pro t_{st})
$Pr =$	0,724		_Prandtlovo kritérium

$\alpha_k =$	6,85464	W/(m ² *K)
$\varepsilon =$	0,95	
$\sigma =$	5,67E-08	W/(m ² *K ⁴)
$Q_s =$	9460,109	W
$\alpha_s =$	16,74771	W/(m ² *K)
$\alpha_0 =$	23,60235	W/(m ² *K)
$Q =$	13332,02	W
$Q =$	0,047995	GJ/hod
$Q =$	320	kWh/den

Měření č.11

Výchozí podmínky:

$r_2 =$	252,5	mm
$t_{w2} =$	252	°C
$t_a =$	20	°C
$S =$	2,315	m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

$t_{st} =$	136	°C
$\nu =$	2,72E-05	m ² /s
$\lambda =$	0,033128	W/(m*K)
$c_p =$	1018,82	J/(kg*K)
$\rho =$	0,86358	kg/m ³
$Pr =$	0,722	

Gr =	8,94E+08	_Grashofovo kritérium
Pr*Gr =	6,47E+08	_součin Pr*Gr
Nu =	101,2399842	_Nusseltovo kritérium pro
$\alpha_k =$	7,009315221 W/(m ² *K)	0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000
$\varepsilon =$	0,95	_součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	_poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel
Qs =	13400,87872 W	_Stefanova - Boltzmannova konstanta
$\alpha_s =$	20,03016093 W/(m ² *K)	_přestup tepla sáláním
$\alpha_0 =$	27,03947615 W/(m ² *K)	_součinitel přestupu tepla sáláním
Q =	18090,36 W	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně
Q =	0,065125281 GJ/hod	_celková tepelná ztráta
Q =	434 kWh/den	

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm	_vnější poloměr kompenzátoru
tw2 =	330 °C	_teplota pláště kompenzátoru
ta =	20 °C	_teplota okolního prostředí
S =	2,315 m ²	_obsah pláště kompenzátoru

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	175 °C	_střední teplota vzduchu (teplota filmu u vnějšího povrchu)
-------	--------	--

Gr =	9,68E+08	
Pr*Gr =	7,00E+08	
Nu =	103,7342	
$\alpha_k =$	6,804963 W/(m ² *K)	
$\varepsilon =$	0,95	
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m ² *K ⁴)	
Qs =	8563,081 W	
$\alpha_s =$	15,94377 W/(m ² *K)	
$\alpha_0 =$	22,74873 W/(m ² *K)	
Q =	12217,89 W	
Q =	0,043984 GJ/hod	
Q =	293 kWh/den	

Měření č.12

Výchozí podmínky:

r2 =	252,5 mm
tw2 =	257 °C
ta =	20 °C
S =	2,315 m ²

Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme tvar ideálního válce

Vlastní výpočet:

tst =	138,5 °C
-------	----------

$v =$	3,18E-05 m2/s	_kynemetická viskozita vzduchu (pro tst)	$v =$	2,75E-05 m2/s
$\lambda =$	0,035625 W/(m*K)	_tepelná vodivost vzduchu (pro tst)	$\lambda =$	0,033292 W/(m*K)
$cp =$	1028,3 J/(kg*K)	_měrné teplo vzduchu (pro tst)	$cp =$	1019,433 J/(kg*K)
$\rho =$	0,7884 kg/m3	_hustota vzduchu (pro tst)	$\rho =$	0,858155 kg/m3
$Pr =$	0,724	_Prandtlovo kritérium	$Pr =$	0,722
$Gr =$	8,63E+08	_Grashofovo kritérium	$Gr =$	9,63E+08
$Pr*Gr =$	6,25E+08	_součin Pr*Gr	$Pr*Gr =$	6,95E+08
$Nu =$	100,1685064	_Nusseltovo kritérium pro 0,00001<=Gr*Pr<=1000000000000	$Nu =$	103,5417
$\alpha_k =$	7,066342653 W/(m2*K)	_součinitel přestupu tepla konvekcí _poměrná pohltivost pro žárovzdornou a nerezavějící ocel	$\alpha_k =$	6,825907 W/(m2*K)
$\varepsilon =$	0,95	_Stefanova - Boltzmannova konstanta	$\varepsilon =$	0,95
$\sigma =$	5,67E-08 W/(m2*K4)	_přestup tepla sáláním	$\sigma =$	5,67E-08 W/(m2*K4)
$Q_s =$	15581,94123 W	_součinitel přestupu tepla sáláním	$Q_s =$	8929,464 W
$\alpha_s =$	21,71245207 W/(m2*K)	_celkový součinitel přestupu tepla na vnější straně	$\alpha_s =$	16,27519 W/(m2*K)
$\alpha_0 =$	28,77879472 W/(m2*K)	_celková tepelná ztráta	$\alpha_0 =$	23,1011 W/(m2*K)
$Q =$	20653,10 W		$Q =$	12674,53 W
$Q =$	0,074351167 GJ/hod		$Q =$	0,045628 GJ/hod
Q =	496 kWh/den		Q =	304 kWh/den

Příloha č. 4: Výpočet poklesu teploty větru

č. m.	tis.m3/hod fouk.	°C THV	m3/hod O ₂	m3/hod vzduch	kJ/m3 i(O ₂)	kJ/m3 i(vzduch)	kJ/m3 i(HV0)	GJ/hod H(HV0)	GJ/hod H(HV1)	GJ/hod H(HV2)	kJ/m3 i(HV1)	kJ/m3 i(HV2)	°C THV1	°C THV2	°C Δt ₁	°C Δt ₂
1	130	1181	6700	123300	1685,631	1767,87	1763,633425	11,46361727	11,31234185	11,35143901	1740,360284	1746,375232	1166,7	1170,4	14,3	10,6
2	130	1181	6250	123750	1685,631	1767,87	1763,918106	11,46546769	11,30925889	11,35919139	1739,885984	1747,567906	1166,2	1171,0	14,8	10,0
3	130	1201	6100	123900	1716,875	1800,53	1796,599885	11,67789925	11,5205229	11,56857909	1772,388139	1779,781399	1186,1	1190,7	14,9	10,3
4	130,5	1200	6090	124410	1715,31	1798,89	1794,9896	11,71230714	11,56318769	11,59486473	1772,136044	1776,990763	1186,0	1189,0	14,0	11,0
5	120	1189	5200	114800	1698,119	1780,93	1777,33961	10,66403766	10,52664044	10,555491	1754,440073	1759,248501	1174,9	1177,9	14,1	11,1
6	135	1201	6500	128500	1716,875	1800,53	1796,497407	12,1263575	11,97025759	12,01240802	1773,371495	1779,616002	1186,8	1190,6	14,2	10,4
7	135	1201	5800	129200	1716,875	1800,53	1796,931148	12,12928525	11,9608611	12,00657801	1771,979422	1778,752298	1185,7	1189,8	15,3	11,2
8	135	1201	6000	129000	1716,875	1800,53	1796,807222	12,12844875	11,96068675	12,00903587	1771,953592	1779,116425	1185,7	1190,1	15,3	10,9
9	135	1200	5900	129100	1715,31	1798,89	1795,237244	12,1178514	11,95218225	11,99899424	1770,693667	1777,628776	1184,9	1189,2	15,1	10,8
10	135	1191	5500	129500	1701,243	1784,19	1780,813556	12,0204915	11,86423265	11,90331972	1757,664097	1763,454774	1176,8	1180,3	14,2	10,7
11	135	1201	5600	129400	1716,875	1800,53	1797,055074	12,13012175	11,98042184	12,01312411	1774,87731	1779,72209	1187,4	1190,4	13,6	10,6
12	135	1201	6000	129000	1716,875	1800,53	1796,807222	12,12844875	11,96415141	12,01134233	1772,466876	1779,458123	1186,1	1190,4	14,9	10,6

Příloha č. 5: Výsledky měření č.1–12 celkově

č.měření	fouk.	THV	O2	Q PU	Kompen.	Šikm.kus	Píšť'.L.s.	Píšť'.P.s.	Píšť'.p.	Kompen.	Šikm.kus	Píšť'.L.s.	Píšť'.P.s.	Píšť'.p.	Celkové ztráty tepla [kWh/den]	Celkové ztráty tepla [kWh/den]	Δt [°C]	Δt [°C]
1	130	1181	6700	19,8	314	290	333	341	337	251	257	309	304	306,5	1009	748	14,3	10,6
2	130	1181	6250	18,6	320	302	323	337	330	242	247	297	306	301,5	1041	709	14,8	10
3	130	1201	6100	19,1	310	319	338	348	343	238	258	302	318	310	1049	729	14,9	10,3
4	130,5	1200	6090	18,6	299	293	340	354	347	262	266	303	311	307	994	783	14	11
5	120	1189	5200	17,7	295	286	311	331	321	245	262	294	302	298	916	724	14,1	11,1
6	135	1201	6500	19	331	310	314	320	317	264	269	294	288	291	1041	760	14,2	10,4
7	135	1201	5800	19	336	334	329	335	332	265	291	297	316	306,5	1123	818	15,3	11,2
8	135	1201	6000	18,8	328	333	336	347	341,5	262	281	292	318	305	1118	796	15,3	10,9
9	135	1200	5900	19,2	330	328	334	338	336	265	271	290	321	305,5	1104	792	15,1	10,8
10	135	1191	5500	18,6	317	310	334	339	336,5	264	271	293	309	301	1042	781	14,2	10,7
11	139	1201	5600	19	309	301	323	342	332,5	252	274	294	330	312	998	780	13,6	10,6
12	135	1201	6000	19,5	330	315	336	344	340	257	263	301	325	313	1095	781	14,9	10,6
Průměr	132,5	1195,7	5970,0	18,9	318,3	310,1	329,3	339,7	334,5	255,6	267,5	297,2	312,3	304,8	1044,2	766,6	14,6	10,7